بيتر أتكينز

إصبع غاليليو

عشر أفكار عظيمة في العلم



ترجمة
د. خضر الأحمد





إصبع غاليليو

عشر أفكار عظيمة في العلم



إصبع غاليليو

عشر أفكار عظيمة في العلم

بيتر أتكينز

ترجمة

د. خضر الأحمد





إصبع غاليليو: عشر أفكار عظيمة في العلم

ISBN: 978-9953-37-590-8

Authorized Translation from the English Language Edition:

Galileo's Finger: Ten Great Ideas of Science

Academia International أكاديميا إنترناشيونال
P.O.Box 113-6669 ص. ب.
Beirut, 1103 2140 Lebanon لبنان 1103 2140 بيروت،
Tel (+961 1) 800811-862905-861178 هاتف
Fax (+961 1) 805478 فاكس
E-mail academia@dm.net.lb بريد إلكتروني

www.academiainternational.com

أكاديميا هي العلامة التجارية لأكاديميا إنترناشيونال

ACADEMIA is the Trade Mark of Academia International

صدرت هذه الطبعة باتفاقية نشر خاصة بين الناشر أكاديميا إنترناشيونال
ومؤسّسة محمد بن راشد آل مكتوم

المحتويات

رسالة مؤسسة محمد بن راشد آل مكتوم

عزيزي القارىء:

في عصر يتسم بالمعرفة والمعلوماتية والانفتاح على الآخر، تنظر مؤسسة محمد بن راشد آل مكتوم إلى الترجمة على أنها الوسيلة المثلى لاستيعاب المعارف العالمية، فهي من أهم أدوات النهضة المنشودة. وتؤمن المؤسسة بأن إحياء حركة الترجمة، وجعلها محركاً فاعلاً من محركات التنمية واقتصاد المعرفة في الوطن العربي، مشروع بالغ الأهمية ولا ينبغي الإمعان في تأخيره.

فمتوسط ما تترجمه المؤسسات الثقافية ودور النشر العربية مجتمعة، في العام الواحد، لا يتعدى كتاباً واحداً لكل مليون شخص، بينما تترجم دول منفردة في العالم أضعاف ما تترجمه الدول العربية جميعها.

أطلقت المؤسسة برنامج «ترجم»، بهدف إثراء المكتبة العربية بأفضل ما قدّمه الفكر العالمي من معارف وعلوم، عبر نقلها إلى العربية، والعمل على إظهار الوجه الحضاري للأمة عن طريق ترجمة الإبداعات العربية إلى لغات العالم.

ومن التباشير الأولى لهذا البرنامج إطلاق خطة لترجمة ألف كتاب من اللغات العالمية إلى اللغة العربية خلال ثلاث سنوات، أي بمعدل كتاب في اليوم الواحد.

وتأمل مؤسسة محمد بن راشد آل مكتوم في أن يكون هذا البرنامج الاستراتيجي تجسيداً عملياً لرسالة المؤسسة المتمثلة في تمكين الأجيال القادمة من ابتكار وتطوير حلول مستدامة لمواجهة التحديات، عن طريق نشر المعرفة، ورعاية الأفكار الخلاَّقة التي تقود إلى إبداعات حقيقية، إضافة إلى بناء جسور الحوار بين الشعوب والحضارات.

للمزيد من المعلومات عن برنامج «ترجم» والبرامج الأخرى المنضوية تحت قطاع الثقافة، يمكن زيارة موقع المؤسسة: www.mbrfoundation.ae.

عن المؤسسة

انطلقت مؤسسة محمد بن راشد آل مكتوم بمبادرة كريمة من صاحب السمو الشيخ محمد بن راشد آل مكتوم نائب رئيس دولة الإمارات العربية المتحدة رئيس مجلس الوزراء حاكم دبي، وقد أعلن صاحب السمو عن تأسيسها، لأول مرة، في كلمته أمام المنتدى الاقتصادي العالمي في البحر الميت ـ الأردن في أيار/مايو 2007. وتحظى هذه المؤسسة باهتمام ودعم كبيرين من سموه، وقد قام بتخصيص وقفٍ لها قدره 37 مليار درهم (10 مليارات دولار).

وتسعى مؤسسة محمد بن راشد آل مكتوم، كما أراد لها مؤسسها، إلى تمكين الأجيال الشابة في الوطن العربي، من امتلاك المعرفة وتوظيفها بأفضل وجه ممكن لمواجهة تحديات التنمية، وابتكار حلول مستدامة مستمدة من الواقع، للتعامل مع التحديات التي تواجه مجتمعاتهم.

مقدمة

نُشُوءُ الفَهْم

لماذا إصبع غاليليو؟ يمثّل غاليليو معْلَماً لنقطةِ انعطافٍ اتّخذ فيها البحثُ العلميُّ اتجاهاً جديداً، فعندها نهض العلماءُ ـ وهذا مصطلحٌ كان، في ذلك الوقت، ينطوي على مفارقةٍ تاريخيّةٍ بالطبع ـ مِنْ على كراسيِّهم يتساءلون عن فعاليّة المحاولات السابقة لتعرّف طبيعةِ العالَمِ بواسطة الفكر والمحاكمة النظرية، وليمشوا أُولَى خطواتهم المضطربةِ في مسارِ العلم الحديث. وإذْ ذاك، صاروا يرفضون كلَّ الحججِ النظريّةِ التي لا تدعمها التجربةُ؛ ومع أنهم لم يبتعدوا كلِّيًّا عن تخميناتهم النظرية وتأمّلاتهم الداخلية، فقد عقدوا تحالفاً جديداً، أكثرَ قوةً، مع تقنيةِ النّهجِ التجريبيِّ الذي يمكن التحققُ من صحّتِهِ علانيةً. نحن نرى هذه السّمةَ لإصبع غاليليو بارزةً في جميع ميادينا العلميّة الحاليّة. نراها في الفيزياءِ، التي كانت أوّلَ موضوعٍ ظهرتْ فيها تلك السّمة؛ وفي الكيمياءِ التي وَجَدَتِ السّمةُ طريقَها فيها في بواكير القرن التاسع عشر؛ وفي البيولوجيا، وبخاصةٍ منذ أن توقّفتِ البيولوجيا عن مجرَّدِ كونها مصدراً لإثارةِ الدّهشةِ والتعجّبِ خلال القرنيْن التاسع عشر والعشرين.

واختصاراً، فإن هذا الكتاب يمجّد فعاليّةَ الإصبع الرمزية لغاليليو، لأنها استطاعت أن تستلّ الحقيقة من بين ركامٍ من الدّعاوَى. هذا وإنّ كوْنَ الإصبع

الفيزيائية لغاليليو هي وحدها التي بقيْت على حالها، في حين ازدهر ما تَحَدَّرَ من تقنياته، فإن هذا، أيضاً، رمزٌ لكونِ الوجودِ الشخصيّ حدثاً عابراً، خلافاً لخلود المعرفة. لذا فإن إصبع غاليليو وحدَهُ، ولم يكن الأوّلَ، في تقديم هذه الطريقة في استكشاف المعرفة، لكنه كان بارزاً جدًّا في تاريخ الأفكار، وهذا يجعل من المعقول أن نتبنّاه بوصفه رمزاً للنهج العلميّ الحديث. إن إحدى السِّمات لهذا النّهج، الذي يتّصف بفعاليّةٍ مثيرةٍ للدهشة في استخراج الحقيقة المتعلّقة بالعالَم، والذي يميّز العلمَ من منافسه الرئيسيّ - الذي يعبَّر عنه، في النهاية، بأنه المحاكمة النظريّةُ البليدةُ - هي مركزيّة التجربة. إنّ الدخولَ إلى العالم، وإجراءَ ملاحظاتٍ فيه ضمن شروطٍ يمكن التحكُّمُ فيها بدقّة، يقلّل إلى الحدّ الأدنى من المكوِّن الذاتيّ - غيرِ الموضوعيّ - لفهمنا، ويُخضِعُ، من وجهة المبدأ، تلك الأرصادَ للتدقيقِ والتمحيصِ من قِبَلِ الجميع.

ابتكر غاليليو، أيضاً، فنَّ التبسيطِ، وعَزْلَ العناصرِ الجوهريّةِ في مسألةٍ ما، وإنعامَ النّظرِ في أفكاره عبر الغيوم التي تُخفي البساطَةَ الكامنةَ في النُّظُم الحقيقيّةِ، تماماً مثلما فعل عندما نظر عبر مِقْرَابِهِ telescope الحقيقيِّ وشاهد تعقيد السماوات. وقد نَحَّى جانباً العربةَ التي يجرّها حصانٌ، والتي يُسمَعُ صريرُ دواليبها خلال إخراجها من الوحل، واختار بدلاً منها بساطةَ كُرةٍ تتدحرجُ على مستوٍ مائلٍ، ونُواساً (بندولاً) pendulum يتأرجح حول نقطةِ تعليقٍ عاليةٍ. هذا العزلُ للظاهرةِ الأساسية عن الفوضى التي تكمن فيها الحقيقةُ. جزءٌ رئيسيٌّ من المنهج العلميّ. فالعلماء يروْنَ اللؤلؤةَ في الصّدفة، والجوهرةَ في التّاجِ.

وبالطبع، سيدّعي البعضُ أنه يوجَدُ ضعفٌ في هذا. فَهُمْ يدَّعون أنّ الفهمَ الصحيحَ يَنْتُجُ من القَبولِ بصخبِ الحقيقةِ: من عجزِ العربةِ عن التقدّمِ في الوحولِ، ومِنْ نحيب العاشقِ، ومن ارتفاعِ القُبَّرَةِ في الهواء. وهم يدَّعون أنّ فحص العلماءِ لفراشةٍ بغيةَ دراسةِ آليّتِهَا إنْ هُوَ إلاَّ تَخَلٍّ عن الفهم. وعلينا أن ننظرَ إلى هذا الاعتراضِ في موقعهِ الصحيحِ، لا أنْ نرفضَهُ حالاً. ويقبلُ معظمُ العلماءِ، لكونهم بشراً، أنّ التفكيرَ العاطفيَّ هو مُكَوِّنٌ رائعٌ لتفاعلنا مع العالَمِ، لكنّ القليلَ منهم يقبَلونه بوصفه طريقاً موثوقاً لبلوغ الحقيقة. إنهم يُؤْثِرون تجزئةَ

التعقيدِ المروِّعِ للعالَم، وفحصَ كلّ جزءٍ بمعزلٍ عن الجزء الذي يليه، ثم تركيبَهُ ثانيةً، بأكبر قدرٍ ممكنٍ من الفهم. هم يدْرسون سلوكَ كرةٍ على سطحٍ مائلٍ ليفهموا حركةَ عربةٍ موجودةٍ على تلّةٍ؛ ويدرسون النُّواسَ ليفهموا تأرجحَ ساقِ الرّياضيّ. أمّا معارضوهم فسيصيحون بأعلى صوتهم مدّعين أنّ فَهْمَ فيزياء الاهتزاز vibration لا توضحُ التمتّعَ بالموسيقى، وأنّ تحويلَ سيمفونيةٍ إلى مجموعةٍ من النغمات الموسيقيّة notes يخرّبُ فهمنا لتأليفها. ويُجيبُ العالِمُ أنه يتعيّن علينا أولاً فَهْمَ ما هي النغمةُ الموسيقيّةُ، ثم الانتقال إلى سببِ كون بعضِ النّغماتِ متآلفةً، وبعضها الآخر متنافرة، ثم - وربما لن يستغرق ذلك عقوداً - محاولة فهم الأثر النفسيّ والفنّي لمتتاليةٍ من النغماتِ. ويتطلّع العلمُ إلى بلوغ الكمال في الفهم، دون إغفال الهدف النهائيّ، ودون الاندفاع إلى هذا الفهم بتسرّعٍ دون أن يكون مدروساً جيداً. وسواءً أدرك العلماءُ سعادتَنَا بفهم العالَم، وبحياتنا فيه، وبفهم جميع الأسئلة العظيمة الأخرى التي يعتبرها الفلاسفةُ والفنانون، والأنبياءُ، وعلماءُ اللاهوتِ واقعةً في مجالاتهم، أمْ لم يدركوا ذلك، فإن هذه مسألةُ محاكمةٍ عقليةٍ بليدةٍ. ونحن نعرف جميعاً حجمَ الفائدة التي نجمت عن ذلك.

●

أنا أعني بالفكرة العظيمة مفهوماً بسيطاً واسعَ الانتشار، كما أعني فكرةً صغيرةً تتفرّع وتتشعّب ليُصبح لها مجموعةٌ واسعةٌ من التطبيقات، وأيضاً عنكبوتاً يستطيع غزل نسيجٍ عنكبوتيٍّ يولّد إيضاحُه وتفسيرُهُ متعةً بالغةً. كان يتعيّن عليَّ أن أكون انتقائيًّا، وأنا لا أشكّ في أنّ ثمة آخرين قد يقدّمون أفكاراً مختلفةً، لكنني سأوردُ خياري فيما يلي.

لقد ركّزْتُ على الأفكار دون التطبيقاتِ. كتبتُ القليلَ عن الثقوبِ السوداءِ والرحلاتِ الفضائيّةِ، وقليلاً من أي شيء - باستثناء ما أوردتُه في مقدّمتي المتّسمة بالتأمّلِ والتفكيرِ - يتعلّق بالتغيّر البديع في طرائق التفسير التي نمارسها حاليًّا بالإفادة من تِقَانَةِ المعلومات (IT) والحوسبةِ computation لقد كان هدفي تحديدَ **الأفكارِ** التي تسلِّطُ الضوءَ على التقدّمِ التقانيِّ، وفي معظمِ

الحالاتِ، توفِّرُ الأساسَ لهذا التقدّمِ. هذا وإن سليلَ غاليليو الفكريَّ الواسعَ الخيالِ، وهو فريمان دايسون Freeman Dyson، يميّز بين **العِلْمِ المدفوع بالمفاهيمِ** concept-driven science، **والعِلْمِ المدفوعِ بالأدواتِ والوسائلِ** tool-driven science. وكلُّ ما أشرحه في كتابي، تقريباً، مدفوعٌ بالمفاهيم. ويحاكي دايسون بهذا التمييز مفكّراً مشهوراً هو فرانسيس بيكون Francis Bacon، الذي صنّف الأفكارَ إلى **أفكارٍ تجلب الثمار** fructifera، **وأفكارٍ تجلب الضوء** lucifera. وأنا أركّز على الأفكار الأخيرة. ومن القضايا المثيرة للجدل تحديدُ ما إذا كانت البيولوجيا الجزيئيةُ molecular biology ونتائجُ معرفةِ بنيةِ الدَّنَا DNA، هي من الصنف الأول أو الثاني من الأفكار، وما إذا كانت مدفوعةً بالمفاهيمِ أم بالأدواتِ والوسائل، ومن ثَمَّ ما إذا كان يجب إيرادُها هنا. وقد اعتمدْتُ الخيارَ الأوّلَ في الحالتينْ، لعدم وجود اكتشافٍ آخر قدّم إسهاماً كبيراً في فهمنا وتطبيقنا للبيولوجيا، لذا فمن السّخف استثناؤه. وربما كنّا نرى في البيولوجيا الجزيئية اندماجَ أفكارِ جَلْبِ الثمارِ بأفكارِ جلبِ الضوءِ في عِلْمٍ ذي ديناميّةٍ لم يسبق لها مثيل.

●

لا يشبهُ العرضُ العلميُّ قراءةَ قصةٍ، حيث تجري الأحداث بطريقة خطِّيَّةٍ بسيطةٍ. وكي تفهمَ فكرةً علميّةً، فربما تكونُ بحاجةٍ إلى قراءتها بسرعةٍ أوَّلَ مرّةٍ، متجاوزاً بعضَ الفقرات التي تتطلّبُ جهداً لاستيعابها، أو التي (لا سمح اللّه) تثير الكثيرَ من الضجر. وفي الحقيقةِ، فمع أنني أرى أنّ ثمة أحداثاً متتاليةً طبيعيّةً لتقديم موضوعٍ، كأنْ ترقى من أساسياتٍ مظلمةٍ إلى أشياءَ واضحةٍ ومألوفةٍ، أو أن تهبطَ من أشياءَ مألوفةٍ إلى أخرى أساسيةٍ (وأنا أتبنّى الأسلوبَ الأخيرَ)، فإنّ فصول الكتاب مستقلٌّ بعضُها عن بعضٍ إلى حدٍّ ما، ومن ثَمَّ يمكن قراءتُها بأيّ ترتيبٍ تشاؤه.

السِّمةُ الثانيةُ التي يجب عدمُ إغفالها هي الانتقالُ إلى التجريد الذي هو صفةٌ مميّزةٌ للعلْمِ الحديثِ. التجريدُ وجهٌ مهمٌّ آخر لإصبع غاليليو، وعلينا أنْ

نكون يقظين، لدوره وأهميته، ذلك أنه، أولاً، لا يعني أنه عديم الفائدة، إذ يمكن أن يكون للتجريد أهميةٌ علميةٌ فائقةٌ، لأنه يشير إلى روابطَ غيرِ متوقَّعةٍ بين الظواهرِ الطبيعيَّةِ، ويسمحُ للأفكار التي نشأت في ميدانٍ ما أن تُستعمَلَ في ميدانٍ آخر. الأهمّ أنّ التجريدَ طريقةٌ نبتعد فيها عن مجموعةٍ من الملاحظات لرؤيتها في سياقٍ أرحب. إن إحدى أسعد اللحظات في العلم - التي يحقّ أنْ يقال فيها **وجدتُّها** !eureka - وفي قراءةِ المواضيعِ العلميّةِ، شبيهةٌ باللحظةِ التي رأى فيها كورتيز Cortez اندماجَ المحيطاتِ في وحدةٍ كاملةٍ، وإدراكهِ للرابطةِ بين الظواهر التي بدتْ متباينةً. ما أرمي إليه هو أنْ نقومَ برحلةٍ إلى أعالي جبال العلْم حيث يمكننا أن نشاهد منها هذا الاندماجَ الرائعَ، وأن نشعرَ تدريجيًّا خلال رحلتنا بالمتعةِ التي تغمرنا نتيجةَ رؤيةٍ مزيدٍ من التجريد. لذا سأبدأُ بقرودٍ وحبّاتٍ من البازيلاّ، وسأسير بين الذرّات إلى الجَمَالِ، ثم أرتحل عبر الزمان - المكان spacetime، وأخيراً أتوّجُ رحلتي بالرياضيّات - التي توفر تمجيداً للتجريد.

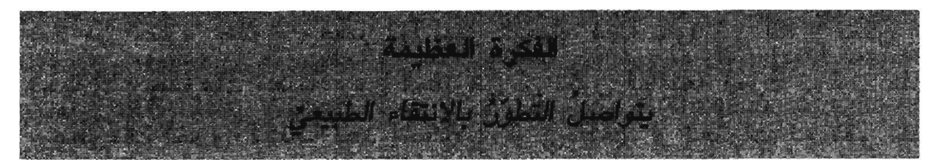
نحن على وشك الانطلاق في رحلةٍ تتسم بالتحدّي، لكنها تُمدّنا، في النهاية، بمسرَّةٍ ومتعةٍ رائعتيْن. العِلْمُ تمجيدٌ لروح النهضة؛ إنه نَصْبٌ تذكاريٌّ استثنائيٌّ للروحِ البشريّةِ ولقوةِ الدماغِ الإنساني الضئيل. أَمَلِي الرئيسيُّ هو أن أتمكّن، خلال تقدّم الرّحلة، وقيادتي لكم برويّةٍ لبلوغ قمّةَ الفهمِ، من جعلكم تشعرون ببهجة التنوّر والمعرفة، التي لا يمكن لغير العلم أن يوفرها لكم.



الفصل 1

التَّطَوُّرُ

بروزُ التّعقيدِ



لا معنى لأي شيءٍ في البيولوجيا إلاّ في ضوء التطوّر
ثيودوسيوس دوبزانسكي

الحياة شيء نفيس إلى درجةٍ جعلت الناس يظنون مدةً طويلةً أنها تتطلب خَلْقاً خاصًا بها. تُرى، ما هو المكوِّن الرئيسيُّ للأشياء التي تُوهَبُ لها الحياة؟ لقد أتت الأجوبة عن مثل هذا السؤال على موجتيْن، أُولاها موجةُ التفسير التجريبي empirical، عندما فحص مراقبون، معظمهم علماءُ من المنادين بالمذهب الطبيعي naturalists وجيولوجيّون في القرن التاسع عشر، الأشكالَ الخارجيَّةَ للطبيعةِ، وتوصلّوا إلى نتائجَ بعيدةِ المدى. بعد ذلك، جاءت الموجةُ الثانيةُ في القرن العشرين، عندما قام أشخاصٌ يملكون عيوناً علميّةً بالغوص عميقاً تحت المظاهر السطحية للأشياء، واكتشفوا الأساسَ الجزيئيَّ لنسيج الحياة. إنّ أُولَى هاتين المقاربتيْن هي موضوعُ هذا الفصل؛ أما الثانية، التي ستُغْنِي كثيراً فهمَنَا لما يعنيه أنْ يكونَ شيءٌ حيًّا، فستكون موضوعَ الفصل التالي.

●

لقد كان لفلاسفةِ اليونانِ القدماءِ آراؤهم الخاصة في طبيعة الأشياء الحيّة، وكما هو الحال في معظم آرائهم الصادرة عن حسن نية، فقد كانت خاطئة تماماً برغم

جاذبيتها. فعلى سبيل المثال، فإن إمبيدوكليس Empedocles (حوالي 490-430 ق.م.) الذي ادّعى الألوهية قبل وقت قصير من محاولته الحمقاء قَذْفَ نفسه في فوهة جبل إتنا البركانية لإثبات ألوهيته، كان يفترض أنّ الحيواناتِ المكوّنةَ من مجموعة شاملة من الأجزاء قد رُكِّبَتْ بأساليب مختلفة، فَوُجِدَ الفيلُ، والبعوضةُ، والضِّفدعُ ذو القرنيْن، والإنسانُ. أمّا كوْنُ العالَم مسكوناً بهذه المجموعات المألوفة بدلاً من خنازيرَ طائرةٍ، وحميرٍ لها ذيولُ السَّمَكِ، فهذا يعود إلى أنه لا يمكن أن يحيا إلاّ مجموعات معيّنة. ومن المفترض أن تكون الطبيعة أَجْرَتْ تجاربَ على مجموعات أخرى، لكنها بعد إشكالاتٍ، أو إرباكاتٍ، أو تعثّراتٍ، لم تَقْوَ تلك المخلوقات التجريبية على الحياة، وماتت.

وقد تكرّرتْ نفس الفكرة بعد قرابة ألفيْ سنة، لكنْ بإدخال اعتبارات جزيئيّة، وذلك من قِبَلِ كونت دو بوفون Compte de Buffon، وجورج لوي لوكليرك George-Louis Leclerc (1707-1788)، الذي افترض أن كائناتٍ حيّةً نشأت عفويًّا من تجمعاتٍ نسميها الآن جزيئاتٍ عضويةً، وأن عدد الأنواع species المحتملة هو عدد المجموعات القابلة للحياة من هذه الجزيئات. هذا وإن العمل الضخم لبوفون بعنوان: التاريخ الطبيعي العام والخاص Histoire naturelle, générale et particulière (الذي بدأ بالظهور عام 1749) خُطِّطَ له ليُعرَضَ في خمسين مجلَّداً. ومن بين المجلدات الستة وثلاثين التي أكملها، خُصِّص تسعةٌ منها للطيور، وخمسةٌ للمعادن، وثمانيةٌ (نُشِرَتْ بعد وفاته) للحيتان والزواحف والأسماك.

لكنْ من أين أتتْ كلُّ هذه المخلوقاتِ، التي هي جميعاً أشياء حيّةٌ؟ ثمة قَدْرٌ هائلٌ منها، سُجِّلَ نحو مليوني نوعٍ، وربما يُمكن اكتشافُ عشرةُ ملايين نوعٍ جديدٍ أو أكثر. هذا وإن أرسطوطاليس، الذي كان له إنتاجٌ فكريٌّ رائعٌ، وأخطاءٌ فادحةٌ، كما هي العادة، افترض أن الحيواناتِ هَوَتْ، من النجوم، أو أنها وُجِدتْ تلقائياً كاملة التكوين. وقد تبنّى هنودُ حوض الأمازون فكرةً أَرِسْطُووِيَّةً مُحَدَثَةً مفادها أن النبتة الإستوائية المسماة مانيهوت maniot - التي يُستخرَجُ من جذورها نشاءٌ مغذٍّ - نبتتْ من رماد الميلوماكي Milomaki الذي قُتِلَ وأُحرق

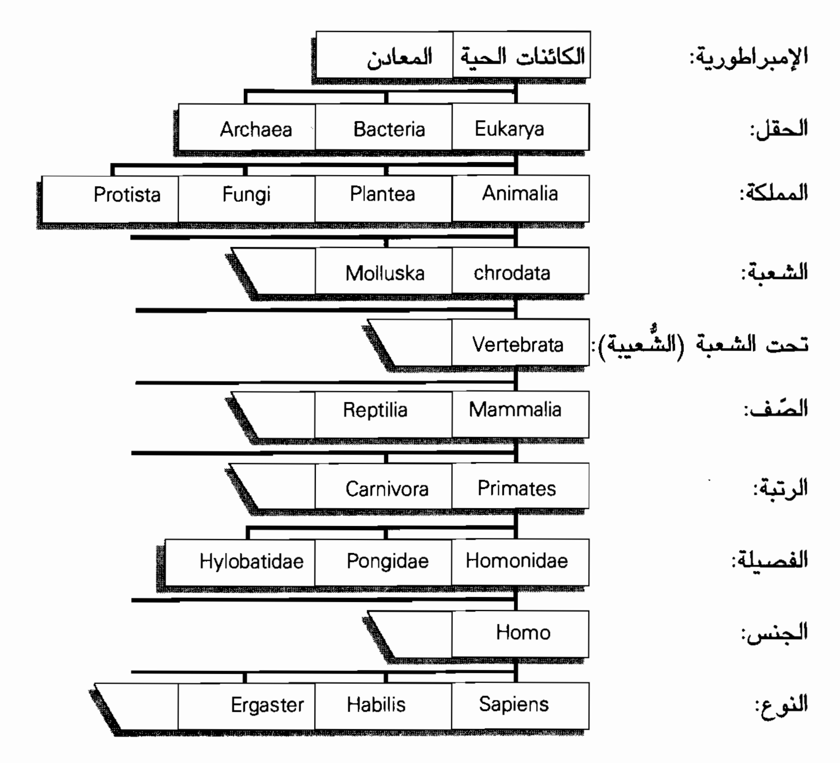
جسده. ولدى هنود كاليفورنيا اعتقادٌ مشابهٌ، إذ تنبتُ الكرمةُ من معدته المحروقة، والبطّيخُ من بؤبؤي عينيه، والذّرّة من أسنانه. وهم يقبلون، بإيمانٍ أضعف، أنْ القمح ينبت من رماد خصيتيه والفاصوليا من منيّه.

وثمة أديان أخرى قدّمت أوصافاً بسيطةً ظاهريًّا، توجَد فيها المخلوقاتُ، كبيرُها وصغيرُها، من قِبَلِ إلّه. بيد أنه حتى بعض آباء الكنيسة وجدوا أن من الصعب القبولَ بكلّ ما ورد في العهدين القديم والجديد. ثم إن أرشيدوق كارلايل Archdeacon of Carlisle، وهو وليام بالي William Paley (1743-1805) اعتبر أنه ممّا لا شك فيه أنه حدّد أصل المخلوقات في الكتاب الذي نشره عام 1802 بعنوان Natural Theology, or evidence for the existence and attributes of the deity collected from the appearances of nature، والذي أورد فيه حجتَهُ الشهيرةَ القائمةَ على أساسِ الشّبه بمسافرٍ وَجَدَ ساعة، وأشاد بتصميمها المعقّد، وتوصّل إلى أنه لا شكّ في وجود صانعٍ للساعات، هو الذي أبدعها. وهكذا فكلّ من يتدبّر تعقيدات الطبيعة، يجب أن يستخلص دون ريب أن للَّه يداً في تصميمها وخلْقها. لكن أناكسيماندر من ميلاطس Anaximander of Miletus (حوالي 610-545 ق.م.)، الذي قدّم إسهاماتٍ إلى الفلسفة الغربية، لمح شيئاً ما من الحقيقة عندما افترض بطريقة تأملية صرفة - كجزءٍ من برنامجه الفلسفيّ الذي أسسه طاليس Thales وأناكسيمين Anaximene لتعليل وجود الأشياء، والوجود بمجمله - أنّ الحيواناتِ يمكن أن يتحوّل كلٌّ منها إلى آخر.

وكما يحدث غالباً في العلم، فإن أوّل خطوةٍ تجاه الفهم الحقيقيّ، لا التأمّل الخياليّ، هي تجميع المعطيات (البيانات) data، التي تعني، في هذه الحالة، تحديدَ وتصنيف جميعَ أنماط الكائنات الحية، التي تكوِّنُ المحيطَ الحيويَّ biosphere، أو على الأقل، تجميع وتصنيف أكبر قدر يَسمحُ به الصّبرُ والمثابرةُ وحسْنَ الإدارة. وأكثر الأسماء فائدةً تعرّفُ العلاقاتِ، كما هو الحال في اجتماعِ أفرادِ عائلةٍ يحتفظون بكنيتهم. وبحلول منتصف القرن الثامن عشر، عندما تأسست تجارة الملاحة الدوليّة، أصبح حتى أولئك الذين يلازمون بيوتهم يعرفون كثيراً من الكائنات الحية والغرائب التي تسكن عالمنا، ويدركون أن أسماءَ بسيطةً، مثل

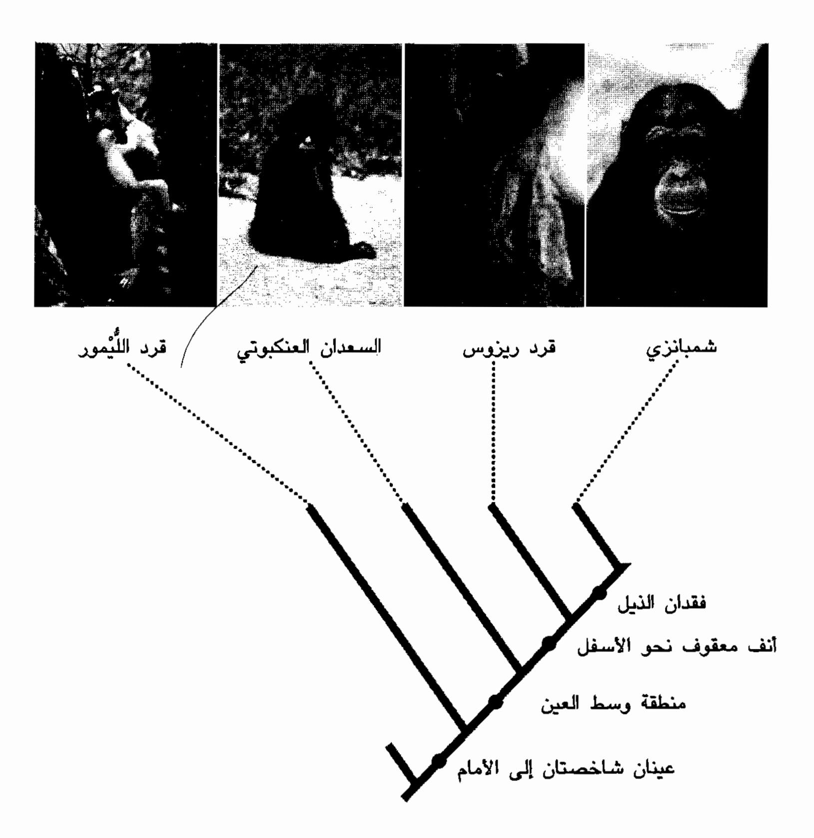
بقرة، وكلب، غيرُ ملائمةٍ، تماماً مثلما يكتشف قاطنو لابلاند Lapland أن لغتهم غير ملائمة في أوغندا. وأوّل نظام من التسميات قُبِلَتْ عالميًّا صُمِّمَتْ من قِبَلِ عالِمِ النبات السويديّ كارل فون لِينِّي Carl von Linné (1707-1778)، المعروفِ لديْنا باسمه الذي أُعطيَ شكلاً لاتينيًّا هو لينايوس Linnaeus. وقد سرد لينايوس نظام تسمياته في كتابه Systema naturae، المنشورِ عام 1735، ثم إن التسمياتِ المنهجيةَ للنباتات مأخوذةٌ عموماً من كتابه Species planetarum الصادرِ عام 1753. وقد قدّم لينايوس التّسلسلَ الهرميَّ للعضوية (الشكل 1-1)، حيث توجد المملكة قريباً من الذروة، أما الهرم فكان آخذاً في التوسع ليشتمل على أنماط تتزايد كلّما هبطنا عبر الشعبةِ phylum، والصّفِّ class، والرتبة order، والفَصِيلَة family، والجنس genus، والنوع. ومنذ ذلك الوقت جرى تفصيل هذا المخطط باحتوائه طبقاتٍ متنوّعةً جرى إقحامها، مثل الفُصَيْلَةِ (تحت الفَصِيلةِ) subfamily، وفوق الفَصِيلَةِ superfamily. وهكذا، فنحن البشر مصنّفون (تهكّميًّا، كما يرى البعض) بأننا من نوع الإنسان العاقل *Homo sapiens* **من الجنس Homo**، في الفَصِيلةِ Hominidae، في فوق الفَصِيلةِ superfamily Hominoidea من تحت الرتبة infraorder كاتارّيني Catarrhini، من الرُّتَيْبَةِ suborder المسمّاة Anthropoidea من رتبة order الرئيسات Primates، من تحت الصّفّ subclas المسمّى Eutheria، في الصّفّ class المسمّى Mammalia، في فوق الصف superclass المسمّى Tetrapoda، الذي هو عضو من تحت الشعبة (الشعيْبةِ) subphylum المسمّاة Vertebrata، من الشعبة Chordata، في المملكة kingdom المسماة Animalia، من الحقل domain المسمى Eukarya، في إمبراطورية الكائنات الحية.

ثمة عيب في النظام اللينابيني Linnaean هو أنه مؤسّس على تعرّف التشابهات وليس على تعرّف العلاقات بينها، وهذا أكثر ملاءمةً من الناحية العلمية. أضفْ إلى ذلك أن التعريفات الدقيقة للصفوف، والشُّعَب، وغيرها، يصعب تقديمها، وأنها في الحقيقة لا تتّسم بأي أهميّةٍ جوهريةٍ. إن النّمطَ السائدَ حاليًّا في علم التصنيف هو الكْلايِيَّاتُ cladistics (حيث klados كلمة يونانية تعني



الشكل 1-1. كان التصنيف اللينايني مكوّناً أساساً من ثمانية مراتب ranks (حقل، مملكة، شعبة، صف، رتبة، فصيلة، جنس، نوع) منظّمةٍ بطريقةٍ تشبه قليلاً نظامَ الجيش الروماني. ومنذ ذلك الوقت، اكتسبت شجرةُ التصنيف كثيراً من المراتب المتداخلة، يبيّن الشكل العلويُّ قليلاً منها. وتبين الشجرةُ كيف ينسجم البشر مع النظام اللينايني الموسَّع. وحيث لا يُظهر مستوى تصنيفيٌّ معيَّنٌ سوى بعض التصنيفاتِ الناشئةِ من تصنيفٍ متفوّقٍ، فإن السّطر ينتهي بشبه منحرف. ويظلّ مخططُ التصنيفِ مثيراً للجدل في كل مستوىً تقريباً: فالبعض، مثلاً، يفضّل التفكيرَ بلغةِ خمس ممالك (مع البكتيريا محتواةً في تلك المرتبة).

برعماً ناشئاً)، وهو يتفحص تحدّر الكائنات الحيّة من سلفٍ مشترك ويحدِّد الفروعَ المختلفة، أو الكلادات clades، لشجيرة الحياة (الشكل 1-2). وقد قدّم الكلاديّاتِ عالِمُ التصنيف الألماني ويلي هِينِيكْ Willi Hennig (1913-1976) وشرحها بالتفصيل في كتابه بعنوان Phylogenetic systematics الصادر عام 1966. ويرى هينيك أن التصنيف يجب أن يعكس العلاقات النَّسَبِيَّةِ



الشكل 1-2. في تصنيفٍ كلاديٍّ cladistic، تتفرّع الشجرة عند بروز كل سمةٍ مميِّزةٍ فريدةٍ جوهريًّا. واصطلاحيًّا، نقول إن التصنيف مؤسَّس على synapomorphies، التي هي تماثلات مشتقة مشتركة. **والتماثل** homology هو سمةٌ موروثة من سلف مشترك.

genealogical، وأن الكائنات الحية يجب تجميعها بدقة في زُمَرٍ على أساس تحدّرها من سلفٍ مشترك. وخلافاً للفيزيائيين النظريين الخالين من الهموم، الذين يتبنّوْن كلَّ يومٍ لمخططاتهم كلماتٍ مثل «التدويم» spin و«النكهة» flavour، فإن هينيك حَمّل علم التصنيف مصطلحاتٍ يونانيةً. ثُمَّ إن الكلاديات تتعامل مع مصطلحاتٍ مثل symplesiomorphies (وهي السّمات المميِّزة التي يتقاسمها أكثر من مخلوق واحد)، وsynapomorphies (المظاهر المشتركة المشتقة)، وهلم جرًّا؛ ولحسن الظنّ، لن نحتاجَ إلى هذه اللغة الثقيلة، ذلك أننا سنستعمل في الأغلب النظامَ اللِّينايني. بيد أنّ الكلاديات قويّةٌ ومنطقيّةٌ ومفيدةٌ جدًّا لكونها

مؤسَّسةٌ على سلسلةِ نسبِ الكائنات الحيّة، وهي الأساس المنطقي الوحيد للتصنيف، كما يدّعي البعض.

ومع ذلك، فإننا نصادف حالاً مشكلةً صعبةً ستسود بقية المناقشة وتزعج حتى النظم الأحدث للتصنيف: فماذا نعني حقًّا بالنوع species؟ ثمة جدل كثير، حتى في أيامنا هذه، يدور حول تعريف هذا المصطلح. ولهذا الجدل أهمية عمليّة قليلة، لكنْ لمّا كان هذا المفهومُ مركزيًّا للمناقشات التاريخية في أصل الأنواع، فنحن بحاجةٍ إلى التطرّق إليه باختصار على الأقل. وفي الحقيقة، فقد يكون من الأفضل القبولُ باستحالةِ وضعِ تعريفٍ مقبولٍ عالميًّا له، واعتبارُ مصطلحِ «نوع» غامضاً، وعدم فرض حدود صارمة على نحو غير ملائم نحصره فيها.

التعريف الفطري للنوع، وهو الذي اعتُمِدَ من قِبَل من يُسمَّوْن أحياناً خبراءَ التّصنيف الترتيبي typotogical taxonomists، هو أنه زمرة من الكائنات الحية التي تبدو ـ أي، تمتلك سماتٍ مميِّزةً مورفولوجيةً يمكن تحديدها ـ مختلفةً عن زمرة أخرى من الكائنات الحية. وكان لدى أفلاطون plato نفس الفكرة تقريباً عندما أورد مفهومه **لإيدوس eidos**، أو «الشكل الكامل»، وهو مَثَلٌ أعلى، جوهر حقيقي، يتمثل، على نحو غير كامل فقط، بالكائنات الحقيقية. ونجد بعض الصعوبة في تمييز العصفورِ الدُّوريِّ من الشحرور بواسطة «سمتيْهما المميِّزتينْ المورفولوجيّتيْن اللتين يمكن تحديدهما» ونحن نعتبرهما نوعين مختلفين من الطيور. ونظن أننا لا نجابه صعوبةً في تحديد سمة «الطَّيْريّة» الأساسية لهذين المخلوقين، وفي رؤية أن هذه السمة مختلفة عن «نباتيّةِ» اللّفت، ثم إنه يمكننا تمييز سمة «الدُّوريَّةِ» من «الشّحروريّة».

ثمة تعريف أكثر تعقيداً هو مفهوم النوع البيولوجي biological species concept يُعرَّف فيه النوع بأنه زمرة من الكائنات الحية تتوالد داخلياً، لكنها معزولة تناسليًّا عن الزمر الأخرى. ووفقاً لوجهة النظر هذه، فإن النوع هو جزيرة منعزلة ذات نشاط تناسلي قوي، وهذا يشبه ميكونوس في منتصف الصيف. ويقتضي هذا التعريف أن العصفور الدوريّ والشحرور نوعان مختلفان

لأنَّهما يتناسلان كلّ في زمرته، لكنهما لا يتهاجنان. يمكن للعزلة التناسلية أن تنشأ بطرائق مختلفة كثيرة. وعلى سبيل المثال، فإن زمر الكائنات الحية قد تكون منعزلة جغرافياً ـ وهذا أحد أسباب كون الجزر مهمة جدًّا في تاريخ الأفكار التطورية ـ أو أنها تتناسل في أوقات مختلفة من السنة. وقد تجد الزمر بعضها بعضاً كريهة (أو، على الأقل، غير جذابة)، أو أنها تجد من المستحيل فيزيائياً أن يتحد بعضها ببعض بالاتصال الجنسي، مهما بلغت قوة شعور إحداها تجاه الأخرى.

وإذا كنا نتوقّع أن تكون آلية الوراثة موضحة بالتفصيل في الفصل التالي، فيمكننا القول إن كلّ نوعٍ يمثّل مُجمَّعاً pool خاصًّا من الجينات، حيث تجول الجينات في المجمّع فيتزاوج أعضاؤها ـ تسمى هذه العملية **تدفّق الجينات** gene flow ـ لكنها لا تهاجر إلى مجمّعات الجينات التي تمثل أنواعاً أخرى. ويؤكد تدفق الجينات من نوعٍ ما أن جميع عناصرها تبدو متطابقة إلى حد ما، لذا فإن مفهوم النوع البيولوجي منسجم مع المعايير المعتمدة من قِبَلِ خبراء التصنيف الترتيبي.

ثم لماذا يكون تعريف النوع مثيراً جداً للجدل؟ إن إحدى المشكلات المتعلقة بتعريفٍ مؤسَّسٍ على التزاوج هي أن بعض الكائنات الحية لا تتزاوج. فمثلاً، لا تتزاوج جميع البكتيريا، ومع ذلك فهي تصنَّف بوصفها أنواعاً، وثمة قدْرٌ كبيرٌ من الأمثلة على كائنات حية متعددة الخلايا multicellular تتوالد لاجنسيًّا asexually (مثل الهندباء البرّيّة *Taraxacum ocinale*)، وتُعتَبر، مع ذلك، نوعاً أصليًّا. وتُظْهِرَ هذه المشكلةُ أن لكلمةِ «نوع» مَعْنَيَيْنِ متمايزيْن أحياناً، أحد هذين المعنييّن، وهو الذي أشرنا إليه آنفاً، يتعلق بالعزلة التناسلية لكائنٍ حيّ. والمعنى الثاني هو أن المصطلح «نوع» ليس إلاّ إحدى النقاط النهائية على طول قاعدة الهرم التصنيفيّ، وهو الوحدة الجوهرية لتصنيف زمرةٍ من الكائنات الحية بقطع النظر عما إذا كانت قادرة على التزاوج مع كائنات حية أخرى أم لا. أي أن النوع هو مجرد **أُصْنُوفَةٍ** taxon وهي وحدة للتصنيف. إن استعمال كلمة «نوع» للدلالة ببساطةٍ على أنّ أصنوفةً عامّةٌ

في علم الأحافيز القديمة palaeontology(*)، حيث يمكن أن ننسب إلى سلالةٍ lineage واحدةٍ أسماءَ مختلفة في مراحل مختلفة من تطورها، على الرغم من أن أعضاءها المتعاقبين لم يتوفر لهم الخيار في النظر في التزاوج. وهكذا فإن *Homo erectus*(**) تطور إلى الإنسان العاقل *H. sapiens*، ولم يجتمعا معاً قطّ: وهما مثال على ما يُسمَّى أحياناً النوع المتزامن chronospecies.

لقد حثّ الاعتراف بهذه الصعوبات على إيجاد طرائق بديلة لتعريف النوع، وعندها نجد تعريفاتٍ تتعارض أحياناً مع مفهوم النوع البيولوجي. وعلى سبيل المثال، فإن إحدى الطرائق في تصنيف الكائنات الحية تتمّ **فِينِيتِيًا** phenetically، حيث توضع الكائنات الحية في نفس الزمرة وفقاً لقياسات موضوعية صرفة، ومن ضمنها القياسات المتقطّعة discrete، كأن نعطي العدد 1 مقابل «له أجنحة»، والعدد 0 مقابل «ليس له أجنحة». إن ألعاب «اِعرفْ شريكَكَ» التي تُنشَر في الصحف والمجلات، ووكالات ترتيب مواعيد للقاءات dating هي فينيتيّةٌ phenetic. وتكمن ميزة الطريقة الفينيتية في أنها موضوعية تماماً، ولا تعتمد على إصدار أحكام ذاتية تتعلق بمظهر الكائن الحي، أو محاولة تخمين ما إذا كان من الممكن لكائنٍ حيٍّ - قد يكون منقرضاً الآن - التزاوج مع آخر. إحدى المشكلات التي تعتري هذا المخطط هي أنه على الرغم من أنّ زمر الكائنات الحية المحدّدة فينيتيًّا تبدو متطابقة تقريباً، فقد تكون مع ذلك غير قادرة على التناسل فيما بينها. وهكذا، فعلى الرغم من أنها تنتمي إلى نفس النوع الفينيتيّ، فهي كائنات حية بيولوجية متمايزة. وكمثال علها نورد ذبابة الفاكهة *Drosophila* التي لها صنفان (غير متهاجنين) هما *D-pseudoobscura* وَ *D. persimilis*. هذان الكائنان الحيّان لا يمكن التمييز بينهما فينيتيًّا عمليًّا، لذا فإنهما يكوّنان نوعاً فينيتيًّا واحداً، لكن لمّا كانا لا يتهاجنان، فإنهما يؤلفان نوعين بيولوجيين.

(*) عِلْمٌ يبحث في أشكال الحياة في العصور الجيولوجية السالفة بناءً على الأحافير الحيوانية أو النباتية التي تمثلها. (المترجم)

(**) نوع يمثل جانباً من التطور البشري، وُجدت أحافيره في جاوة والصين، ويُنْسَب إلى العصر البلستوسيني. (المترجم)

هناك تعريفات أخرى لما تعنيه كلمة نوع، لكن تطبيق المعايير التي تستند إليها هذه التعريفات تؤدي إلى مزيد من عدم الوضوح. فمفهوم النوع البيئي ecological species concept يعترف بأهمية الدور الذي تؤديه البيئة والموارد، والأخطار التي تنجم عنها. وهو يعرّف النوع بأنه زمرة من الكائنات الحية التي تستغل بيئة وحيدة تتوفر فيها العوامل الضرورية لوجود هذه الكائنات. ويهتم مفهوم تعرّف النوع recognition species concept بقدرة كائن حيٍّ على تعرّف زوجٍ محتمل. إحدى ميزات هذا التعريفِ، المرتبطِ بقوةٍ بمفهوم النوع البيولوجي، هي أنه في حين يجب استنتاج القدرة على التهاجن في معظم الحالات، فإن التعرّف يمكن غالباً ملاحظته مباشرةً. وقد يحدث أن ينشأ نوع جديد عندما لا تنجح زمرةٌ من الكائنات الحية في تعرّف أزواجها السالفين كشركاء محتملين. هذا ولا يحتاج التعرّف أن يكون عن طريق المظهر: فالنباتات والحيوانات تتواصل فيما بينها بكثير من الطرائق، من ضمنها الصوت، أو حتى بطرائق لا تعيها حواسّنا، وذلك بواسطة إصدار وتفحّص المواد الكيميائية التي نسميها فيرومونات pheromones، والتي يُدخلها البشر أحياناً، لأسباب مشابهة تماماً، في عطورهم ومستحضراتهم التجميلية. وأخيراً (في هذا العرض الموجز فقط، لأنه توجد تعريفات أخرى)، ثمة مفهوم خاص بالتاريخ الجيني للنوع phylogenetic species concept، حيث يعرّف النوع بأنه نوع من الكائنات الحية لها سلفٌ مشترك، لكنها مختلفة في سمةٍ مميِّزةٍ، واحدة على الأقل. وطبقاً لهذا التعريف، فإن أعضاء نوعين مختلفين بتاريخهما الجيني قد لا يختلفون سوى بسمةٍ مميزةٍ واحدة، ويكونون قادرين على التهاجن.

●

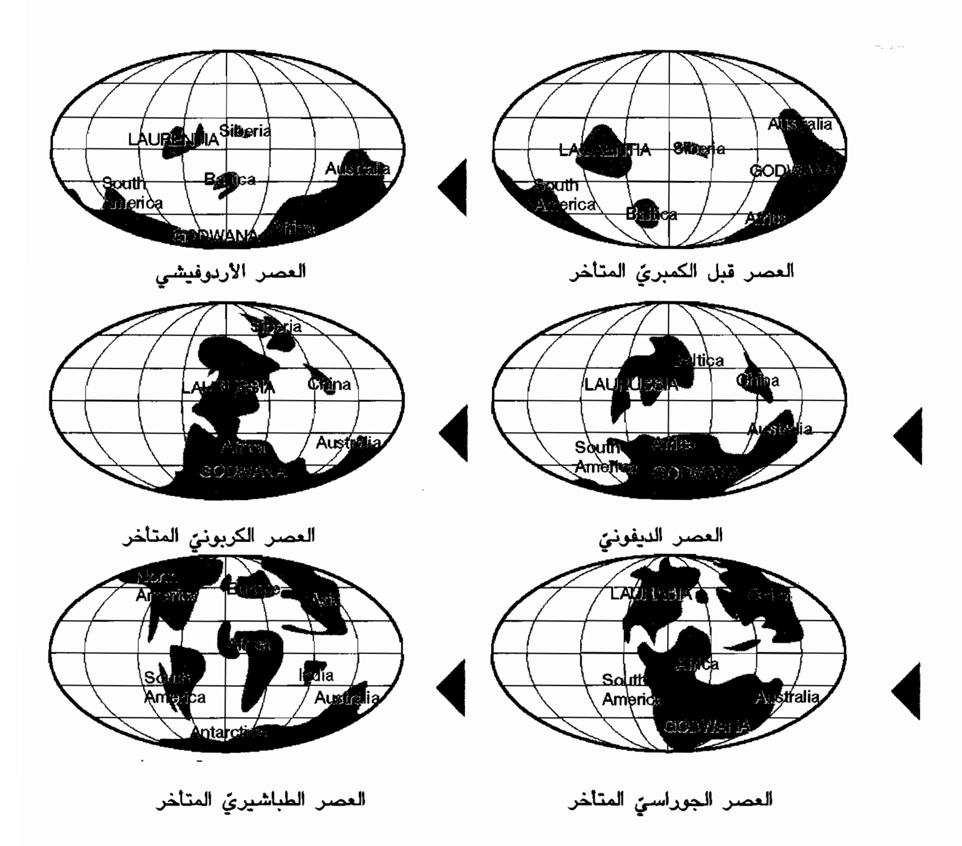
ما مِنْ شكٍّ في أن الأنواع تطورت ومازالت تتطور. الدليل على التطور الماضي هو سجل الأحفوريات (المستحاثات) fossils، التي توفر سلسلةً استثنائيةً تبيّن كلَّ من قَطَنَ الأرضَ عبر الزمن. السجلّ غير كامل، تماماً مثلما لا يقدّم أيّ متحف حالياً - يولي المتحف عادةً اهتماماً بمقتنياته أكثر من اهتمامه بالأرض

الخام ـ مثالاً على أي نوعٍ باق على قيد الحياة، لكنه يمكّننا من الرجوع بالزمن إلى الوراء للوصول إلى أسلاف الأشياء الحية، من ضمنها أصولنا في الماضي القريب.

إن علم سجلاّت الأحافير وتعليلها على امتداد تاريخ الحياة على الأرض يسمى علم الأحافير القديمة palaeontology. وكان صيادو الأحافير القدماء يؤمنون بوجهة النظر الأفلاطونية التي ترى أن الأحفور هو صورة شكل مثالي نشأ نتيجة فعل نوع معين من البلاستيكا plastica. بيد أننا نعرف الآن أن المستحاثة مكوّنة من أجزاء معدنية من هياكل عظمية (العظام مكوّنة أساساً من فوسفات الكالسيوم وغضاريف بروتينية) وأسنانٍ (أيضاً فوسفات الكالسيوم وَغُلُفٍ صلبةٍ متنوّعة). وتوجد الأحافير في الصخور الرسوبية، وهي الصخور التي تكوّنت خلال خزن المعادن وانضغاطها، مثل الجير. أما الصخور البركانية، التي ارتفعت إلى السطح من الأعماق الكبيرة، فلا تحتوي على أحافير البتّةَ. ويُوجد بعض الأحافير في الصخور المتحوّلة metamorphic وهي صخور رسوبية أو بركانية جرى تعديلها بفعل حرارات وضغوط عالية. بعض الأحافير مواد عضوية، مثل الخشب، أصبحت معدنية، لأن الماء كان ينفذ إلى الفجوات الداخلية ويملؤها بترسبات صخرية. وقد زال السلف العضوي كلياً، ثم إن الأحافير التي نستخرجها من الأرض هي صورة معدنية ثلاثية الأبعاد، وهي طبق الأصل للأحافير الأصليّة. وغالباً ما تحافظ الأصدافُ على حالها، لكن الصيغة الأراغونيتية aragonite لكربونات الكالسيوم التي تتكوّن منها تتحول إلى شكل أقسى وأكثف يسمى الكالسيت calcite. هذا ولا تُحفظُ المواد العضوية بهذه الطريقة، لكن بصمات الرّيش (نوعٌ صَلْدٌ من البروتين) والأجزاء اللحمية (المؤلفة من أنواع ليّنةٍ من البروتينات التي تتخللها الشحوم) غالباً ما توجد محفوظةٌ في الصخرة التي طمرت فيها الأحفورة. وتُحفَظُ بعض المخلوقات الصغيرة جيداً في الراتنج المقسّى الذي نسميه العنبر (الكهرمان) amber. وقد اكتُشفت مخلوقات أكبر، مثل حيوان الماموث، محفوظة في الثلج الجليدي.

الأرضُ الموجودةُ تحت أقدامنا حيّةٌ، بمعنى أنه يوجد فيها عدد لا يُحصى من المناطق المصهورة التي تولِّد مناطق جديدةً من اليابسة، وهي الطبقة الصلبة الخارجية التي تغلف القسم الداخلي المنصهر من الأرض. هذا وإن كتلة كبيرةٌ مرتفعةً من الصّهارة magma تجعل اليابسة تتمدد من المنطقة التي ترتفع منها، ثم تغطس ثانيةً إلى الأسفل بعيداً عن منطقة ارتفاع الصهارة. وتُغمَرُ في سير هذا الناقل قطع من القشرة نسميها قاراتٍ، تجول حول سطح الكرة الأرضية. إن عملياتِ الألواح التكتونيّة plate tectonics هذه كانت مهيّأةً أصلاً لعالَمٍ حقير، اقترحه الجيولوجي الألماني أَلْفْرِدْ وِيغْنَرْ Alfred Wegener (1880-1930)، وناقشه في كتابه بعنوان أصل القارات والمحيطات The origin of continents and oceans (1915)، لكنه قُبِلَ منذ عام 1960 نتيجة البحوث التي بيَّنت أنّ ما افتُرِضَ حتى الآن قاعاً بحرياً صلداً وغير متحرك، قد غيّر مظهر الأرض (الشكل 1-3). وقد سبّب هذا أيضاً انبعاجاً محلياً في القشرة القارية امتدت آثاره من تكوّن الجبال إلى تشكل الصّدوع، والتلال الواقعة في سفوح الجبال، والوديان.

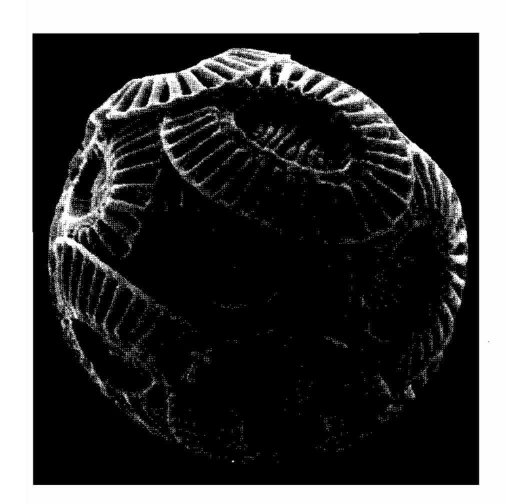
وفي وسط هذا الهيجان والتجعّد في القشرة الأرضية، ليس من المفاجىء أن تحدث بعض حالات الاختلاط للطبقات الجيولوجية، عندما تُدفَعُ، في مكانٍ هنا وآخر هناك، أحفورة من جيلٍ لتقعَ دون أحفورة من جيلٍ آخر، وتُنْقَلُ أحفورةٌ قديمةٌ من مكانٍ ما لتمتزج بأحافير تحدّرتْ منها. ويمكننا عادة اكتشاف هذه الأحداث غير العادية الظاهرة بواسطة متابعة شكل الطبقات ورؤية أنها قد انبعجت. وفي الحقيقة، فعندما ندرس قوة الأحداث التكتونية المتحدة مع الآثار العنيفة للطقس، وعندما تجمدت المحيطات في حقب جليدية، واندفعت المجْلداتُ glaciers إلى الأمام والخلف، ثم اجتاحت موجات مدّية (تسونامي من الماء الذائب، ارتفاعاتها مئة متر) المحيطاتِ عندما تراجع الجليد، فمن المدهش أن يوجد أي سجل لماضينا السحيق. وقد استعر أوار الحرب العالمية ـ الأرض ضد الكائنات الحية، والكائنات الحية ضد الكائنات الحية ـ على بقايا الحياة، ونحن محظوظون لوجود حتى سِنٍّ وحيدٍ في هذا العالَم.



الشكل 1-3. إن نظرتنا إلى الأرض، بالتوزع المألوف للقارات، تتخذ سمةً مختلفةً كلِّيًا إذا نظرنا إليها على المدى الطويل. وفي مقياس زمني يعتمد ملايين السنين، يكون السطح مائعاً، والقارات طافيةً على الكرة مع انبثاق المادة من الداخل، التي تستقر في مناطق واقعة على مسافات كبيرة. ونرى في سلسلة هذا المخطط البروز التدريجي للأرض الحديثة خلال البليون سنة المنصرمة (ولمعرفة المزيد من المعلومات عن كل من هذه العصور الواردة في المخطط، انظر الشكل 1-9). وتبيّن الأشكال العليا المناطق التي قدّرَ لها أن تتحول في النهاية إلى قاراتنا وبلداننا الحالية.

لكننا وجدنا أكثر كثيراً من سِنٍّ. فإذا وُجِد شيءٌ يسمى الحظّ في الموت، عندئذٍ يمكن أن تحلّ كارثة بديناصور قد تودي به إلى الموت، فيغمره الوحل، وتكسوه طبقة من الرسوبيات، ومع ذلك نراه وهو يخرج من كل ذلك إلى ضوء الشمس عندما يستأصل التآكل سطح الأرض. ويتألف أغنى سجل للأحافير من

لافقاريّاتٍ بحريةً مع هياكلها العظميَّة عاشت في مياه ضحلة. وأقل الأحافير بقاءً على نحو جيد هي الكائنات الحية التي ليس لها هيكل عظمي، والمخلوقات التي يسهل إصابتها بالأذى مثل الطيور. وتحدث بعض الأحافير بأعداد كبيرة: فالتلال الطباشيرية هي أكوام من بقايا أحفورية لطحالب (أشنيات) وحيدة الخلية تسمى حاملات المكوّرات البحرية coccolithophores (الشكل 1-4). ويُخْزَن من أحافير هذه الطحالب 1.4 بليون كيلوغرام سنويًّا، ووجودها في ماء البحر مسؤول جزئياً عن لاشفافيته. وفي الحقيقة، ففي صيفي عامي 1997 و1998 تغيّر لون بحر بيرنغ Bearing Sea من أزرق غامق إلى زبرجديٍّ بسبب امتلائه ببلايين طحالب حاملات المكوّرات الحجرية خلال حياتها الصامتة، لكنِ السعيدة، وهي في طريقها لتصبح مرتفعاتٍ أرضيةً في المستقبل.





الشكل 1-4. صورة أُخذت بالمجهر الإلكتروني لنوعٍ عامٍّ من حاملات المكوّرات الحجرية coccolithophere، وهو الذي يسمّى *Emiliana huxleyi*، وكلّ جسم له شكل صُرَّةٍ هو مكوّرة حجرية *coccolith* منفصلة. هذا وإن مرتفعاتنا الطباشيرية والجيريّة مكوَّنة من حاملاتِ المكوّرات الحجريةِ الميّتة أو المضغوطة.

إن سجل الأحافير، برغم كونه بعيداً جدًّا عن الكمال، يساعد كثيراً في فهم التطور، الذي تأتي فيه الأنواع وتذهب، ويتحوّل فيه نوعٌ إلى أنواع أخرى، وتنقرض أنواع أخرى، وهذا يشبه بمجمله شجيرةً تتفرع أغصانها، وتموت غصيناتها، وتمثل أوراقُها محيطَنا الحيويَّ الحاليَّ. ويبدو أن السجل يبيّن تاريخ

المحيط الحيوي الشبيه بالشجيرة، الذي تشوبه خطوطُ تَحَدُّرٍ غامضة أحياناً، لكنْ جديرة بالقبول. بيد أنه توجد تفسيرات بديلة للسجل الأحفوري، ولما كان الأمر مهمًّا جدًّا لفهم موقعنا في الطبيعة، فنحن بحاجةٍ إلى تفحّصها.

أحد بدائل مذهب التطور evolutionism هو مذهب التحوّل transformism؛ وسندرس هذا الاقتراح في وقت لاحق. وهنا ننظر في بديل آخر هو مذهب الخَلْق creationism، الذي يقضي بأن كلَّ نوع يظل على حاله دون أن يتغير أبداً؛ باستثناء تغير قليل. ووفقاً لمؤيدي مذهب الخَلْق، يبرز النوع إلى الوجود كاملاً، ومصمَّماً ببراعة، بعد أن نُفِخَتْ فيه الحياةُ من قِبَلِ خالقٍ غيرِ مخلوقٍ، كُلِّيِّ القدرةِ، ويستحق التقديسَ. ربما كانت الأنواعُ سرمديَّةَ الوجودِ، بل ربما تؤول إلى الانقراض، مفسحةً المجالَ لإحدى التجليات الجديدة لرغبة غامضةٍ للخالق. وللخالق قدرةٌ غير محدودة على تصميم وإيجاد الحيوانات التي يبدو أنّ لها قدرةً على تعذيب وتشويه وقتل بعضها بعضاً. ومن بين ما صنعه الخالقُ، بإرادته الحرة بالطبع، الإنسان.

إن مذهب الخَلْق، الذي يتضمن المصطلحَ المموَّه بوضوح، وهو «التصميم البارع» Intelligent Design، ليس علماً: إنه توكيدٌ غيرُ قابلٍ للاختبار تفرضه أجندةٌ مدفوعةٌ دينيًّا مفصولة عن العلم. وكي نكون بأعلى درجة من العدل في الحكم على الأشياء، فإن مذهب الخلْق يقوم، إلى حد بعيد، مقام Simplicio التي جاء بها غاليليو، وهي وسيلة أدبية لتبيان أن تعليلاً علميًّا ما، في حالة المذهب التطوريّ، يوفّرُ تعليلاتٍ أرفعَ منزلةً. ومن المهم أن العلْمَ مطلوبٌ دوماً لتوفير تعليلات؛ والمشكلة التي تواجهنا في مذهب الخلق هي أن مؤيديه لا يدركون أنها ليست سوى Simplicios، وأن إزعاجهم المتواصل، بل تشويههم للأدلة مضيعةٌ للوقت، ومرهقٌ، ومحفوفٌ بخطر إغماض عيون الشبان على الأمجاد الحقيقية للخلْق.

وهكذا، فما هي الحجج التي تُساق ضدّ مذهب الخلْق؟ ثمة كثير جدًّا منها، بحيث أننا لو أوردناها جميعاً، لما اتسع هذا الفصل لها. ومن الممكن إلقاء لمحةٍ

على سماتها المميِّزة بتقديم ثلاثٍ فقط منها. أولاً، لقد تكوّن عدد كبير من الأنواع الجديدة في الأزمنة الحديثة. ثانياً، يحاجُّ البعض أحياناً في أن التطور لا يملك قوةً تنبؤيّة، لذا فلا يمكن اختباره، ومن ثم فهو لا يمثل نوعاً من العلم أكثر مما يمثله مذهب الخلْق. هذه الدّعوى ليست صحيحة، إذ إن التطور قد نتج من ملاحظاتٍ لبقايا أنواعٍ موجودة حاليًّا من المخلوقات (الماكروسكوبية). وقد غدا من الواضح في القرن العشرين أن التطور يمكن أن يُتَابَعَ على مستوىً جزيئي. والتنبؤ الفعّال هو أن تفصيلات التطور الجزيئي يجب أن تكون منسجمةً مع تفصيلات التطور الماكروسكوبي. وقد وُجد أن هذا صحيح، إذ لا وجود لمثالٍ للآثار الجزيئية للتغير التي لا تنسجم مع ملاحظاتنا للكائنات الحية كلها. ثالثاً، إن أحد الاختبارات القانونية لانتهاك حقوق الطبع هي ملاحظة ما إذا كان الكتاب موضع الاتهام يكرِّرُ الأخطاءَ الواردةَ في الكتاب الأصليّ، التي تُرتكَبُ عمداً أحياناً فيه. ويورِدُ راسمو الخرائط، أحياناً، أخطاءً بسيطةً ـ بيتاً إضافيًّا، مثلاً، في صورةٍ تمثل منظراً طبيعيًّا ـ لاكتشاف المنتحلين. ثمة نوعان من الأخطاء المنتحَلَة في البيولوجيا. في أحدها، ينطلق التطور باتجاه غبيٍّ (ليس له بصيرة)، وعندئذٍ يتعين عليه أن يتحمل العواقب. وتمثل عين الثدييّات مثالاً كثير الورود، لأنه خلال تطور العيْن، فإنها تَحْصُرُ نفسَهَا في تصميمٍ تافهٍ، يمكن اعتماده من قبل مصمِّم تافه Potty Designer، إذ تكون الأوعية الدموية أمام الشبكية، ومن ثم يتعين عليها مغادرة العين بإقحامها الشبكية مخلفةً نقطة عمياء blind spot. وقد اتُّبع هذا التصميم منذ ذلك الحين. ويحدث النوع الآخر من الأخطاء على المستوى الجزيئي بصيغة جينات زائفة pseudogenes، مثلاً، وهي مساحات طويلة ضيقة غير وظيفية منسوخة لدنا طَافِرِيٍّ mutant DNA وهو مكافىء البيوت المزيفة في الخرائط[1].

لِنَعُدْ إلى العلم والحقيقة المرسّخة للتطوُّر. التطور المكرويّ microevolution هو عملية تطوّر التعديلات الصغيرة. التطور الماكرويّ macroevolution هو نشوء أنواعٍ جديدةٍ ومجموعاتٍ أعلى (رتب، فصائل،

(1) بغية الحصول على وصف مفصل لهذا الدليل انظر: http://www.talkorigins.org/faqs/molgen/.

وهكذا) نتيجة تراكم التغيرات التي يُحدِثها التطورُ المكرويّ، وهذه عملية تسمى التدرّجَ النّوْعيّ phyletic gradualism. وكما لاحظنا سابقاً، فإن الدليل التجريبي لهذا التطوّر التدريجيّ محجوبٌ بعدم الكمال المفترَض للسجلّ الأحفوري، الذي غالباً ما يفتقر إلى الأشكال الانتقالية التي قد نتوقّعها. ويوجَد تفسيران محتملان: أحدها أن الأشكال الانتقالية كانت موجودة فعلاً، لكنها اختفت دون أن تترك أثراً. التفسير البديل هو أن التدرج النوعي غير صحيح، وأن السجل الأحفوري أكمل مما كان يظن الناس وأن تَشَكُّلَ تَنَوُّعٍ speciation جديدٍ حدث في أوقات خلال بضعة آلاف من السنين عَقِبَ المدة الطويلة من الخمود والسكون. وقد اقترح هذه النظرية المثيرةَ جدًّا للجدل، التي تسمَّى التوازن المتقطّع punctuated equilibrium نيلز إلدريدج Niles Eldridge، وستيفن غولد Stephen Gould (1941-2002) عام 1972. ويُفترَضُ في هذه النظرية أنّ مجموعةً منعزلةً صغيرةً تعرّضت لدفقةٍ من التعديلات خلال عمليّةٍ تسمى التنوع المتباين المنطقة allopatric speciation (وتعني كلمة «ألوباتري» ببساطة أن التغير يحدث في منطقة جغرافية مختلفة عن سلفها). لذا فمن غير المحتمل أن يحوي الموقع السّلفيّ سجلاً للأشكال الوُسطى، ومن ثَمَّ ستوجَد أحافير الأنواعِ الجديدةِ في الموقع السلفيّ فقط إذا عادت الأنواعُ الجديدةُ المتطورةُ تماماً للانتشار فيه ثانيةً: والغياب المفهوم للأشكال الوسطى يُعزّز الانطباعَ بأن الانتقالَ بين شكلين يحدث بسرعة.

إن التدرجَ النوعيَّ، والتوازن المتقطِّعَ، بالشكل الذي اقتُرِحَ أول مرة، يمكن اعتبارهما، بأفضل وجه ممكن، بأنهما نهايتان متقابلتان لطيفٍ من الاحتمالات. وليس من المناسب اعتبارهما نموذجيْن متنافسيْن للتطور، بل علامات على عدَّادٍ يشير إلى السرعة التي يحدث بها التنوع. هذا وتقابل بعضُ الأحداث، كنشوء بعض الأنواع، قراءةَ مؤشرٍ قريبٍ من التدرّج، وبعضُ الأحداث الأخرى، كنشوء أنواع أخرى، قراءةَ مؤشر قريبٍ من التقطّع punctuation. ويصعب جدًّا التمييز بين سرعة تطور نوعٍ والتوثق من أن السجلَّ الأحفوريَّ تامٌّ. ولا يعني هذا القول أن النُّسَخَ الأحدث للتوازن المتقطّع ليست غيرَ مثيرةٍ للجدل، لأنه جرتْ دراستُها

بالتفصيل وراء نطاق المزيج «السريع ـ البطيء» في أبكر تجلياته، وذلك، جزئيًا، بواسطة دعوى آليات صيانة ركود أحداث التغير السريع. هذا وإن الموقف الفلسفيّ للنظرية مثيرٌ للجدل أيضاً، لأنه في حين تفترض الداروينية أن التنوّعَ هو تراكمُ التغيراتِ الممثِّلَةِ للتكيّف، فإن التوازن المتقطّع ينظر إلى التنوع بوصفه القوة الدافعة للتكيف. إنّ وجود مثل هذه النقاط المثيرة للجدل يجب ألاّ يُفَسَّرَ بأنه إخفاق لنظرية الانتقاء الطبيعي (أو، بالطبع، إخفاقٌ لحقيقة التطور): إنها علاماتٌ على جدل حامي الوطيس يدور حول تفصيلاتِ واحدةٍ من أهمّ العمليات في العالَم.

ثمة نقطة أخرى يجب توكيدها. لا يقود التطوّر بالضرورة إلى تعقيدٍ أشدّ؛ فاتجاه التطور ليس نحو الأعلى دوماً. فقد يجد كائنٌ حيٌّ أنّ بمقدوره تسريعَ نشاطه التكاثري، ومن ثَمَّ يسكن في الأرض بنجاح أعلى، إذا نبذ قدراً كبيراً من عاداته البالية الاجتماعية أو التشريحية. فلماذا الانزعاج من الكثير من النشاطات الاجتماعية غير الضرورية إذا كان بالإمكان التوجه إلى العملية المركزية للتكاثر بدونها؟ يُضافُ إلى ذلك أن البيئة قد تتغير، وأن الأعضاء الباقين من نوع لم ينجح، قد يجدون فجأة أن ساعتهم قد اقتربت، وأنه يمكنهم في ظل الظروف التي تغيرت التفوق في التكاثر على منافسيهم الأكثر نجاحاً حتى الآن. إن لطائفة الحيوانات البحرية التي تسمى الزِقِّيَّاتِ، والتي تنبثق من البحر *(Ciona intentinalis)* حلاً آخر، وهي كسولةٌ جدًّا. هذا الحيوان الصغير صيّاد متحرك له شكل اليرقة، لذا فهو بحاجة إلى دماغ، لكنه ما إنْ وَجَد بيئةً مناسبةً يستطيع البقاء فيها ليصبح مقعداً، لم يعد بحاجةٍ إلى التفكير، لذا فإنه يأكل دماغه الذي يسبب له الإرهاق. الأدمغة تَستهلكُ قدراً كبيراً من الطاقة، وإنها لفكرةٌ جيدة أن تتخلّص من دماغك عندما تكتشفُ أنه لم يعد لك حاجة به.

●

تُرى، كيف ينشأ هذا التنوُّع الغنيّ للحياة؟ لقد عرف وليام بالي William Paley، كما سبق ورأينا، أنه كان يعرف، لأنه كان واثقاً بأن كلّ نوعٍ خلقه اللّه. وقد ظن

أيضاً جان باتيست بيير أنطوان دومونيه J. B. P. Antoine de Monet، وهو حاملُ لقب فارسٍ دولامارك Chevalier de Lamark (1744-1829) أنه كان يعرف، وكان مثيراً للإعجاب فكرياً أكثر من بالي، ذلك أنه ناضل كثيراً لحل المسألة المتعلقة بإيجاد آليَّةٍ. لامارك، الذي كان جندياً، ثم كاتباً في مصرفٍ، وفي وقت لاحق مساعداً لعالم نبات، وأخيراً أستاذاً في الحشرات والديدان، أمضى حياته فقيراً، وقد فقد بصره كلِّيًّا في أواخر أيام حياته. وقد لاحقه الفقر حتى بعد موته، إذ دُفِن في قبرٍ مستأجَرٍ، ثم أُخرجَ من القبر عندما انتهت مدة الإيجار بعد خمس سنوات إلى قبر آخر، وتشتَّتت رفاته. ويقترن اسمه الآن بالاحتقار أكثر مما يقترن بالاحترام، ومع ذلك فهو جدير بالاحترام بوصفه مؤسس البيولوجيا اللافقارية (وهذا الاسم هو الذي وضعه)، ولأنه حاول، على الأقل، العثور على تفسير لوجود الأنواع. بدأ بنشر توقعاته - التي لم تكن، قطعاً، نظرياتٍ علميةً - المتعلقة بآلية التطور، وذلك عام 1801، لكنّ أَكْمَلَ دراسةٍ له قدّمها في كتابه Philosophie zoologique الصادر عام 1809.

افترض لامارك أن كل الكائنات الحية مشغولة في سعي ميتافيزيقي نحو الكمال لتتحول من بذرة كائنٍ حيٍّ أصليٍّ وحيد الخلية يتضمن نوعاً ما من الجوهر الأفلاطوني للنوع، وهذا السعي مدفوع «بموائع عصبيّةٍ» لأنواع متنوعة غير محدّدة جيداً تغذّي الأعضاء التي تعمل، وتجوّع الأعضاء التي لا تعمل. وتوقّع أيضاً - وهذه سِمَتُهُ التي تُذكِّر الناس به، مع أنه ربما اعتبرها قسماً ضئيلاً من أطروحته الإجمالية - أنه حالما تُكْتَسَبُ السِّماتُ المميِّزة، فإنها تُوَرَّثُ. وأشهر أمثلته هو استطالة رقبة الزرافة نتيجة سعيها لبلوغ أوراق الأشجار العليا، لتصبح زرافة أكمل، علماً بأن الاستطالة التي أُنجزتْ في جيلٍ ستُورَّثُ إلى الجيل التالي.

قد نسخر من السذاجة الشديدة للفكرة، لكنْ قبل أن تلغي البيولوجيا الجزئية أيّ آليةٍ محتملةٍ لمثل هذه الوراثة، كان من الصعب إثبات خطأ هذا المفهوم. هذا وإن آراء لامارك، التي يُشار إليها بمصطلح التحوّل transformation بدلاً من التطوّر، استمرّ وجودها حتى في القرن العشرين. كان الدّحض التهكمي

لها شائعاً، لكنْ غير متصلٍ بصميم الموضوع: فَخِتَانُ أجيالٍ متعاقبةٍ عدة، الذي لم يؤدِّ إلى ضمور القُلْفَةِ (جلدة الذّكر التي تُقطع في الختان) ليس حجة، لأن الطفل الصغير لم يكن يسعى لفقدان قلفته. وفي سلسلة مشهورة لتجارب سيئة، قام البيولوجيّ الألمانيّ الشهير أوغست وايزمان August Weismann (1914-1833) بقطع ذيول أجيال متعاقبة من الفئران دون أن يحدث قصر في طول أذناب الأجيال التالية. إن جميع تجارب البتْر - وقد أُجري الكثير منها، إما مصادفةً أو عن قصد - مع أنها تدحض الدعوى القائلة بأن السّماتِ المميزةَ المكتسبةَ تُوَرّثُ، فلا علاقة لها بالسمة المركزية للتحوّل وهي وجهة نظرة لامارك بأن السعي striving مركزي، لأنه حينئذٍ يصبح يبدأ مائع التحوّل بالجريان.

وفي كتاب آثار الخلْق The vestiges of Creation (1844) قدّم الناشرُ روبرت تشيمبرز Robert Chambers (1871-1802) تفسيراً ممكناً. فقد أدرك أهمية الطفرات، لكنه حاجّ في أن النوع الجديد يتحدّر على شكل نزوةٍ من حادثِ ولادةٍ مشوّهةٍ. لذا فإذا خُلِقَتْ سمكةٌ بجناحين وريشٍ ومنقارٍ، وهذا غير قابل للتعليل، فعندئذٍ يكتسب المحيط الحيويّ شيئاً ما يُشبهُ طيورَهُ، وفي نفس الوقت تقريباً، فإن مجموعة الأعمال بعنوان Bridgewater treatises، التي تمّتْ رعايتُها بوصيةٍ من رجل الدين رفرند هنري إيكرتون R. H. Egerton، الإيرل الثامن والأخير لمقاطعة بريدج ووتر Bridgewater، «بغية إظهار قوة اللّه ولطفه وحكمته، التي تبدو في خلقه الذي يوضحها هذا العمل، وفقاً لكل الحجج المعقولة، مثل تعدّد مخلوقات اللّه وتكوينها»، كانت واسطةً لنقل التعبير عن عددٍ من الأفكار المعاصرة. وقد احتوتْ هذه الأعمال بحثاً بعنوان «تَكَيُّفِ الطبيعةِ الخارجيّةِ مع التكوين الأخلاقي والفكريّ للإنسان» كتبه توماس تشالمرز T. Chalmers (1833)، وبحثاً آخرَ بعنوان «تَكَيُّفِ الطبيعةِ الخارجية مع الحالة الجسمية للإنسان» كتبه جون كيد J. Kidd (1837). ومن وجهة نظر حديثة، يمثل كلا البحثيْن المقابلَ المضبوطَ لما نعتقد الآن بأنه هو الصحيح.

وفي هذه المرحلة المتأخرة من الفصل، يتوجّه زعيمُ مذهب التطوّر تشارلز روبرت داروين (1882-1809) بحياءٍ إلى هدفه. ويمكن أن نعزو نجاح داروين في

تحديد أصل الأنماط المختلفة من الكائنات الحية إلى انغماسه في العالَم الطبيعي من عام 1831 إلى عام 1836، حيث كان يعمل رفيقاً إسميًّا، لكنْ عالِماً بالتاريخ الطبيعي فعليًّا، على متن السفينة الملكية بيغل Beagle التي كان قبطانها روبرت فيتزروي R. FitzRoy، وهو ابنٌ غيرُ شرعيٍّ للملك شارك الثاني. كان فيتزرويْ يريد رفقةَ شخصٍ في رحلته الطويلة ليخلّصه من عزلته، وبخاصةٍ كي يتفادى مصيرَ سَلَفِهِ على السفينة الذي أَطلقَ النارَ على نفسه، علماً بأنه كان يعاني خوفاً ممّا حلّ بعمّه الفيكونت كاسلريغ Castlereagh، الذي كان وزيراً، والذي حَزَّ رقبتَه في نوبةِ اكتئابٍ أصابتْهُ.

إن الغوص في قدْرٍ هائلٍ من المعطيات، غالباً ما يكون مقدمة لاكتشافٍ عظيمٍ يكمن في اللاّوعي أولاً. وأخيراً ينطلق في الفكر الواعي لتوليد أَنْفَسِ حدثٍ علميٍّ شخصيٍّ، يمكن لصاحبه أن يصيح بأعلى صوته: وَجَدْتُهَا!

وخلال سنوات رحلته الخمس، أمضى داروين عدة أشهر على اليابسة، وكان يرحّب عادة بذلك، لأنه يخلّصه من دُوارِ البحرِ الذي كان نادراً ما يفارقه على متن السفينة الصغيرة[2]. وكانت أشهر إقامة مؤقتة له، التي طالتْ خمسةَ أسابيع، بدءاً من 15 أيلول/سبتمبر عام 1835، في جزر غالاباغوس («جزر السلاحف»)، المحاذية لساحل الإكوادور على المحيط الهادئ، حيث كانت سفينته، مثل كثير من السفن قبلها، تجمع السلاحف الضخمة للحصول على لحمها الطازج لأكله في رحلة العودة. وكانت جميع السلاحف الضخمة في الجزر الكبيرة قد جرى اصطيادها وانقرضتْ؛ لكنّ بعض الأنواع نجت في الجزر الصغيرة. وغالاباغوس هي سلسلةٌ من الجزر البركانية وصَفَها هيرمان مِلْفيلْ H. Melville الذي زارها في وقت آخر، بعمق أقل كثيراً من وصف داروين، بقوله «إنها خمسة وعشرون ركاماً من بقايا البراكين منتشرة هنا وهناك في قطعة أرض في ضواحي مدينة». وحتى داروين لم يقدِّرْ أهميَة زيارته إلى أنْ صارت الجزرُ خلفه في رحلة العودة، إذْ سجّل أنه كان من الصعب تصوّر أنّ «الجزر

(2) كان طول السفينة بيغل 27 متراً، وعرضها 7 أمتار.

الإستوائية لم تكن مفيدة للإنسان». فالضباب المدوِّم، والتيارات المتنقّلة التي تحيط بتلك الجزر ولّدت لقبها وهو Los Encantadas («الجزر الفاتنة») لأنها كانت في الحقيقة كذلك، إذ إن الضّباب المجازيَّ، الذي حَجَبَ حتى الآن أصلَ الأنواعِ، بدأ بالانقشاع، وذلك عندما أدخلَ داروين نكهةً إلى لحم السلاحف التي كان يُساعد على ذبحها، وتأمّل في القرون الكامنة بين جثث الطيور التي جمعها من جزر مختلفة (لم يزر سوى سان كريستوبال، وفلوريانا، وإيزابيلا، وسانتياغو). وكما ورد تقريره:

ويمتلك كثيرٌ من هذه الجزر أنواعاً خاصة بها من السلاحف، وطيورَ السُّمنةِ، وعصافيرَ الدوريِّ، والعديدَ من النباتات. ولهذه الأنواع نفس العادات العامّة، وتعيش في ظروفٍ متماثلة، وبالطبع، فهي تَشْغَلُ نفسَ الموقع في الاقتصاد الطبيعي... لقد أصابتني بالدهشة.

وكما سبق ولاحظنا، كانت الجزر مهمةً جدًّا في تقديم النظرية التي كان يُطْلِقُ عليها داروين عادةً اسمَ الانتقاء الطبيعي natural selection. ولم تقتصرْ هذه الجزر على تبسيط النظام البيئيّ، ومن ثَمَّ تجعل الفروق قابلة للملاحظة على وجه أبسط، لكنها في الحقيقة تعزل مجموعاتِ السّكّان، وبذلك تسمح للتغيّر والتكيف بالحدوث.

ومع أنه تأثّر بالسلاحف، وبرز لديه كثيرٌ من التساؤلات، فقد كان داروين يفتقر إلى الشرارة التي تدفع بأفكاره إلى العلن، وحين انطلقت الشرارة، قدّم آراءه في 28 أيلول/سبتمبر، عندما كان مايزال يتأمل وفرة المعلومات التي حصل عليها خلال رحلته الطويلة. وقد قرأ بقصد التسلية مقالة مالتوس Malthus بعنوان مقالة عن مبدأ السكان (1798) Essay on the principle of population كتبها المحترم الأنيق والمهذّب توماس مالتوس (1766-1834)، وهو أستاذٌ في الاقتصاد السياسيّ عُيّنَ ليدرّسَ علمَ الاقتصاد لموظفي شركة الهند الشرقية. وفي هذه المقالة، حاجّ مالتوس في أنّ قَدَرَ البشريّةِ مشؤومٌ لأن عدد السكان يتزايد بمعدل أسرع من معدل المنتجات الغذائية، ومن ثم فلا مفرّ للبشرية من زيادة مصادرها الغذائية. وفي وقت لاحق تذكّر داروين هذه المقالة وكتب ما يلي:

إن كوني مهيَّأً لقبول الصراع في سبيل البقاء الذي يستمر أينما كان نتيجة ملاحظاتٍ

استمرت طويلاً لعادات الحيوانات والنباتات، فقد أذهلني أنه في هذه الظروف، تميل التغيرات الملائمة إلى البقاء، وتنزع التغيرات غير الملائمة إلى الزوال.

وفي وقت لاحق، قال توماس هكسلي T. Huxley (1825-1895)، معاون داروين: «من الغباء الشديد ألاّ يجرى التفكير في ذلك سابقاً».

وقد واصل داروين التأمّل في ملاحظاته طوال قرابة عشرين سنة، كان خلالها يبني نظريته في الانتقاء الطبيعي تدريجياً، ويجمع البيّناتِ اللازمةَ لها، دون أن يهجر تماماً اعتقاده بالوراثة اللاماركية للسمات المكتسَبة، لكنه كان يخشى نشْرَ نظريته. وقد بدأ بكتابة وصفٍ لأفكاره عام 1856، بقصد جعْلها قويةً وموثوقةً وجديرةً بالاعتماد والقبول، كما حدث لجورج إليوت G. Eliot مع الدكتور كاسوبون. لكن خططه تعرقلتْ بسبب اتّجاه القرّاء للتعرف على ما أبدعه مالتوس، وقد رَاعَ داروين أن يستلم مخطوطةً من ألفرد راسل والاس A.R.Wallace (1823-1913) عنوانها نزعة الأنواع إلى الابتعاد بلا حدودٍ عن نمطها الأصلي On the tendency of varieties to depart Indefinitely from the original type. كان والاس من النسل المتأخر للبطل الأسكتلندي وليام والاس W. Wallace، وقد قام بجولاتٍ واسعةٍ في غابات الأمازون بوصفه جامعَ أنواعٍ محترفاً من عام 1848 إلى عام 1852. ولما كانت توقعاتُهُ من عمله في أوروبا ضئيلةً، قرر السفر إلى أرخبيل الملايو (الأرخبيل الأندونيسي)، ووصل إلى سنغافورة عام 1854. وفي شهر شباط/فبراير عام 1858، وذلك بعد سنين من السفر والجمع، وخلال معاناته هجمةَ ملاريا في جزيرة موليكاس Moluccas (الجزيرة غير معروفة بدقة، لكنها كانت إمّا جيلولو Gilolo وإمّا ترناتي Ternate)، أدرك ـ مثل داروين ـ أن أفكار مالتوس هي المدخل إلى تفسير التطور.

وقع داروين في مأزق، لأن هذه كانت أفكاره هو، وهو الذي أنشأها ورعاها طوال عقدين من الزمان، وكانت أولويته فيها تكاد أن تُفْلِتَ منه. لذا استشار صديقيه السير تشارلز ليل Sir C. Lyell، وعالمَ النبات جوزيف هوكر J. Hooker. ولما لم يكن بمقدورهما استشارةُ والاس، فقد قرّرا أن يقدّما مقالة والاس السابقة والملاحظات التي جمّعها داروين في الاجتماع التالي للجمعية

اللِّينايِنيّة في لندن بتاريخ 1 تموز/يوليو عام 1858. ومنذ اللحظة، خرج الانتقاء الطبيعي من السِّرِّ إلى العَلَن. وقد تخلّى داروين عن أعظم ما أبدعه، واختصر بشدة ما خطط لنشره، وأصدر في شهر تشرين الثاني/نوفمبر عام 1859 كتابه بعنوان أصل الأنواع On the origin of species، أو، بوجه أدق، بعنوانٍ استعاد فيه الأسلوب القوطي الفيكتوري هو:

On the origin of species by means of natural selection or the preservation of favoured races in the struggle for life.

وحتى داروين ظن أن هذا العنوان مرهقٌ إلى حد ما، ومع ذلك، ففي الطبعات اللاحقة (وكانت خمس طبعات إضافية) كان كل ما فعله هو إسقاط كلمة On[3]. وقد علّق بقوله:

لديّ شيئان مختلفان أقوم بدراستهما: أولاً، تبيان أن الأنواع لم تُخْلَقْ منفصلاً بعضها عن بعض، وثانياً، أن الانتقاء الطبيعيّ كان العامل الرئيسيّ في التغيير.

يجب تركيز اهتمامنا الآن على داروين، الذي يعتبر عموماً مكتشفَ الانتقاء الطبيعيّ. لكنْ من الخطأ تجاهلُ والاس كلِّيًا في هذا السياق، وذلك، على الأقلّ، بسبب النُّبْلِ الذي جعله يعزو أولويةَ الاكتشاف إلى داروين. بيْد أن ثمة سماتٍ معينةً لحياة والاس الطويلة التي تُدنِي من منزلته في هذا الميدان. فلم يقبلْ قط أن يكون من الممكن تطوّرُ البشرِ دون نفحةٍ وتوجيهٍ مقدسيْن، لذا حاول حصر الانتقاء الطبيعي بتطور الشكل، تاركاً تكوين الوعي لشيء ما أعلى منزلةً. وقد ضاق عليه أصدقاؤه عندما رأوا أنه صار في وقت لاحق في حالة ضياع في الطرق الفرعية الضبابية اللانهائية للمذهب الروحاني نفسه.

●

الانتقاء الطبيعيّ فكرة بسيطة، لكنّ تطبيقها معقّد جدًّا لأن الأشياء التي يجب أن نُدخلَها في الاعتبار تتطلّبُ حذراً واحتراساً شديديْن. واختصاراً، لا وجود

(3) لا تظهر كلمة «evolution» في الطبعة الأصلية؛ ولا يتعامل الكتاب بصراحة مع أصل الأنواع، وهذا ما يزال سؤالاً يدور نقاش حوله.

لسلحفاةٍ تشكل جزيرةً، وبغية دراسة دور الانتقاء الطبيعيّ لنوعٍ من السلاحف، علينا النظر في استجابتها لجميع النباتات والحيوانات الموجودة في جوارها، وأيضاً في الحالة الفيزيائية والمناخية لموقعها. ولتطور سلحفاةٍ نتائج أيضاً تتعلق بمنافسيها ومفترسيها، والتي، بدورها، ستؤثر في السلحفاة. وخلافاً للنظم الخطّيّة البسيطة التي تجتاز فيها التأثيراتُ سلسلةً بسيطةً من الأوامر، فإن المجال الحيويّ نظامٌ غيرُ خطيٍّ غنيٌّ جدًّا، حيث ترتدّ التغيراتُ في كائن حي إلى الكائن الحيّ عندما يعدِّلُ تطوّرُهُ بيئتَهُ. إن التطوّر مع الزمن للنظم غير الخطية أمر يصعب جدًّا التنبؤ به، ولا عجب في أن المؤمنين بمذهب التطوّر عاجزون عن التنبؤ بمستقبل المحيط الحيوي، الذي يمجّده التعقيد غير الخطّيّ. وهنا، سأورد بإيجاز بعض الأفكار التي تميّز التخليق (التركيبَ) الحديثَ modern synthesis، أو الدّاروينيّةَ المُحْدَثَةَ neo-Darwinism، التي برزت كأفكارٍ تتعلّق بعلم الوراثة، وُجِدَتْ لتعزيز الأفكار المتعلقة بالتاريخ الطبيعي الرّصديّ observational خلال بواكير القرن التاسع عشر. وفي الحقيقة، فلم يكن الانتقاء الطبيعيّ مقبولاً إلاّ بحلولِ الثلاثينيّات من القرن العشرين، وبتأسيس التخليق الحديث. وكما أشرت آنفاً، فإنني سأقتصر، إلى حد بعيد، في هذا الفصل على علم الظاهرات (الفينومينولوجيا)، تاركاً القاعدة الجزيئية للتطور لأبحثها في الفصل التالي.

يعتمد الانتقاء الطبيعي على ثلاثة مبادئ:

1. ثمة تغير جينيّ وراثي (قابل للتوريث)

يعني هذا أن أعضاء نوعٍ معطًى ليست نَسَائِلَ clones متطابقة؛ ثمة ضجيج جيني في النوع. لم يكن لدى داروين أي فكرة عن آلية الوراثة، وحَبَّذَ نظريةَ «مزجٍ» تتحول فيها السّمات المميِّزة لوالديْن جرى بينهما جماع إلى نوع من «قِدْرِ المزج». إن هذا الجهلَ بالآلية الحقيقية، والميلَ إلى آليةٍ وصفها منتقدوه بسرعةٍ أنها لا يمكن أن تنتهي إلى التطور، كانت حجرَ العثرةِ الرئيسيَّ الذي اعترض قبولَ أفكاره. وربما كانت القصةُ مختلفةً لو أن داروين أزعج نفسه

بقراءة رسالةٍ من راهبٍ مغمورٍ، هو غريغور مندل G. Mendel الذي سلّمه المفتاح الذي كان يساعده على حل مشكلته.

2. الآباء الذين يفرطون في التكاثر

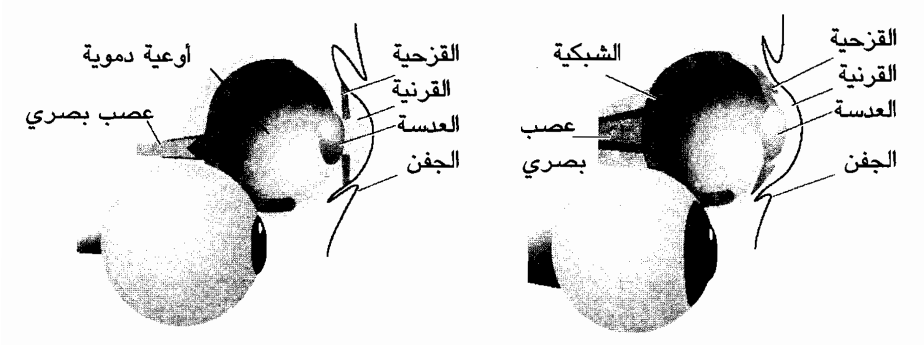
وهذا يعني، كما يردد مالتوس، أن الآباء ينجبون ذرية أكثر مما يمكن أن يبقى منها على قيد الحياة. بعض الأنواع، مثل الفيل، لا ينجب إلاّ مرة واحدة، وقد يموت الوليد؛ وثمة أنواعٌ أخرى، مثل الضفادع، تُنجب آلافاً قد لا يظل على قيد الحياة سوى واحدة. الإفراط في التكاثر يحدث بقدرٍ أقلّ في الكائنات الحية المعقّدة والكبيرة التي تتعهّد رعايةَ مواليدها سنواتٍ، مثل الفيلة، وربما مثل الآباء من الطبقة الوسطى في الدول الغربية.

3. الذرية الناجحة هي تلك التي تتكيَّف بأفضل وجه ممكن مع البيئة

«النجاح» هو شيء أكثر من مجرد البقاء على قيد الحياة: إنه القدرة على الاستمرار في التكاثر. هذا المبدأ هو أساس العبارة التي أُسيءَ فهمها جدًّا، والتي تفوّه بها أحد الذين ينتمون إلى الجناح اليميني من مؤيدي مبادئ الحرية في القرن التاسع عشر، هو هربرت سبنسر H. Spencer، والعبارة هي «البقاء للأصلح»، وقد ذكرها (عام 1862 تقريباً) في سياق تطوير داروينية اجتماعية Social Darwinism، التي وسّع فيها الفكرةَ الأصيلَة للانتقاء الطبيعي لتشمل ديناميّاتِ المجتمعاتِ، وَفَتَحَ إذ ذاك البابَ لعلم تحسين النسل eugenics، ولإلغاء جميع أشكال تدخّل الدولة، والعِرْقِيّة racism. وكما هو الحال في جميع الشعارات، فإن «البقاء للأصلح» شعارٌ جدير بأن يُذْكَرَ، وقد أُغْرِيَ داروين على استعماله في الطبعات الأخيرة من كتابه، لكنه يخفض من قيمة الفكرة التي ينادي بها.

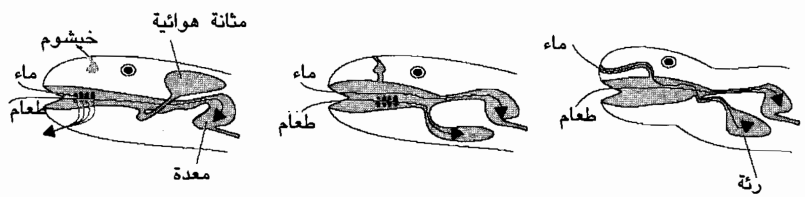
عند النظر في الانتقاء الطبيعي، يتعيّن ألاّ يغيب عن بالنا أنه موضعيٌّ كلّيًّا في الزمان والمكان. الانتقاء الطبيعي يلتزم تماماً بالوقت الحاضر ولا ينظر في العواقب. فإذا تبيّن أن تكيُّفاً ما شيءٌ يؤسَفُ له في المستقبل، فسيكون المستقبل غيرَ محظوظٍ: فلا يمكن للانتقاء الطبيعي التوقُّعُ بأنه يدفع نوعاً ما إلى طريقٍ

تطوريٍّ مسدود؛ وفي الحقيقة، فهو لا يمكن توقع أي شيء، حتى في اليوم التالي. يعيش الانتقاء الطبيعي مؤقتاً، وهو قمة الاستمتاع بالحياة. وَعَيْنُ الثدييات مثالٌ سبق وذكرناه: فبواسطة انعطافٍ حادٍّ للتطور، فإن اللطخة الأصليّة الحسّاسة للضوء التي كان من المفترض أن تتطور إلى عضو إدراكيٍّ رئيسيٍّ، بدأ بأوعيةٍ دمويّةٍ على جانب اللطخة التي سينتج منها تغطية الشبكيّة في الوقت المناسب (الشكل 1-5). الحساسية للضوء سلاحٌ قويٌّ للافتراس وتفاديه، وكانت أهميتها في بقاء كائنٍ حيٍّ على قيد الحياة في هذا الترتيب غير الملائم أفضل من نبذ هذه الميزة بواسطة إزالة أو عكس الترتيب لتحسين البصر بعد ملايين السنين. إن عين الحبّار squid أكثر كمالاً في هذا المجال (لكن ليس في مجالات أخرى)، لأنها تطورت على طول طريقٍ تطوريٍّ وقعتْ فيه الأوعيةُ الدمويةُ خلف الشبكية الحسّاسة للضوء. وثمة مثال هو عدم الملاءمة في ترتيب الأنابيب داخل أفواهنا، حيث يتقاطع المجرى التنفسي والبلعوم، وهذا يفسح مجالاً للاختناق. ويتقاطع هذان المجريان لأنه في سلفٍ مبكِّرٍ من السّمك الرئوي lungfish، فإن فتحة الهواء التي كانت تستعملها السمكة للتنفس في سطح الماء، كانت تشغل موقعاً



الشكل 1-5. يبيّن الشكل في اليسار المخطط العام لعين الثدييات. لاحظ كيف أن الأوعية الدموية موجودة في مقدمة الشبكية الحساسة للضوء، وعليها أن تجد طريقها للخروج عبر الشبكية، وبذا تترك نقطة عمياء. ويبيّن الشكلُ في اليمين الترتيب الذي يبدو أكثرَ حساسيَّةً في حيوان الحبار، حيث يكون تزويد الدم خلف الشبكية. ومع أن التطور تعثّر في كل ترتيب، فلا يمكن عكس أي منهما لأن قيمة الحساسية للضوء للبقاء على قيد الحياة - التي تطورت إلى الرؤية - عالية جدًّا. ومصادفةً، يبدو أن ثمة فائدةً واحدة، على الأقلّ، لترتيب الثدييات: فتدفق الدم في هذا الترتيب قد يساعد على تخفيض الإصابة بالمرض.

ملائماً جدًّا في أعلى الخَطْمِ snout، وقاد إلى مكان مشترك يتقاسمه مع مجرى الطعام (الشكل 1-6). لم يكن ثمة تراجعٌ عن هذا الترتيب، برغم وجود أخطاره. إن للاقتصاد الذي يبدو غيرَ صحيٍّ في استعمالِ قضيبِ الرَّجلِ لكلٍّ من الجماع (وهذا يحتوي الطقوس المرافقة له، وبخاصةٍ عند البشر) والتبوّل، أساساً تطوريًّا مماثلاً. أضف إلى ذلك أن الأنبوب الذي يذهب من الخصيتين إلى القضيب يقع في الجانب الخطأ من الأنبوب الذاهب من الكلية إلى المثانة.



الشكل 1-6. مثال آخر على نقص التبصّر غير الملائم يتجلّى في التطور الأعمى للمجرى التنفسيّ والأجهزة الهضمية في الثدييات. ويبيّن الشكل في اليسار مخطط سمكة نموذجية. فالخيشوم يؤدي إلى تجويف مغلق يستعمل في المقام الأول لحاسة الشم. يُستخرَج الأكسجينُ من الماء الذي يدخُلُ عبر الفم ثم يطرد عبر الخياشم gills. وتُستعمَل المثانةُ الهوائية للتحكم في العمق، مثل حاويات الأثقال التي تُستعمل في الغواصات. ويبين المخطط الأوسط ترتيباً في السمك الرئوي، وهو سلفُ الثدييات الحديثة. ينفتح المنخر عبر ممرٍّ إلى تجويف الفم، لكنه مايزال يُستعمل لحاسة الشم فقط. يُبْلَعُ الهواء عن طريق الفم ويدخل إلى المثانة الهوائية. إنها خطوة تطورية قصيرة يجب القيام بها للترتيب النموذجي في الثدييات، المبينة في المخطط الأيمن، حيث تُستعمل المناخير الآن لأخذ الهواء. ولسوء الحظ، فإن الهواء والطعام يتقاسمان غرفة قبل دخول الهواء إلى الرئتين عن طريق القصبة الهوائية، ودخول الطعام إلى المعدة عن طريق المريء. إن هذا الترتيب «التطوري» المفهوم، يُبْعِدُ خطرَ الاختناق.

من غير الممكن، أساساً، التنبؤ بالانتقاء الطبيعي، لأنه حصيلةُ نزعاتٍ متنافسةٍ أحياناً، ثم إن التكيّفات التي يبدو لأول وهلة أنها قد تكون مفيدةً تظلّ مستعصيةً على التحقيق. وكمثال بسيط نورد الزائدة الدودية في البشر. ففيما يتعلق بنا، فإنها خَطَرٌ علينا، لأنها يمكن أن تمرض وتؤدّي إلى الموت. وتنتجُ التهاباتُ الزائدةِ الدوديةِ عندما تُحدِث العدوى infection التضخمَ، الذي يضغط على الشريانَ الذي يزود الزائدةَ الدوديةَ بالدم. إن التدفّقَ المستقرَّ للدم في الزائدة الدوديّة يقيها من نموّ البكتيريا فيها، ومن ثم فإن أيّ انخفاضٍ لتدفق الدم يُساعد على العدوى، وهذا يؤدي إلى مزيدٍ من التضخم. ولو انقطع الدم عنها كلّيًّا، فإن

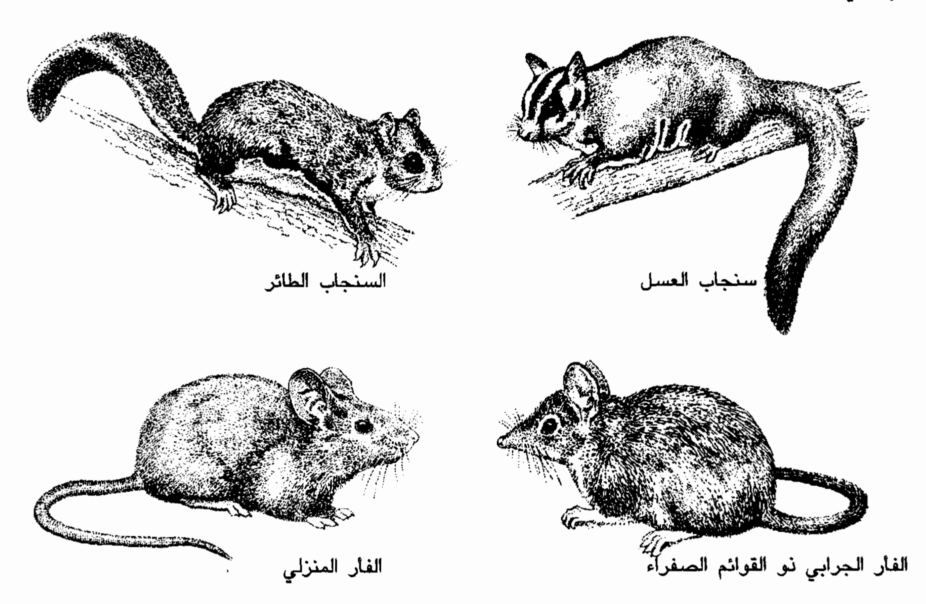
البكتيريا تنشط وتنفجر الزائدة الدودية. إن زائدةً صغيرةً أكثر عرضةً لهذه السلسلة من الحوادث من زائدةٍ كبيرةٍ، لذا فإن التهاب الزائدة الدودية يُحْدِثُ ضغطاً انتقائيًّا يحافظ على زائدةٍ كبيرةٍ، بمعنى أنه من الأخطر كثيراً البدءَ بالتقلّصِ من أن نستمرَّ بما حصلنا عليه. لذا، فبرغم أخطارها، فإنه يصعب جداً على التطور التخلص من الزائدة الدودية.

الانتقاء الطبيعي سباقٌ للتسلح. وفرضيّةُ الملكة الحمراء Red Queen hypothesis هي الفكرةُ التي مفادها أن الوحوشَ المفترسةَ والفرائسَ تنخرط في معركة دائرة، تقوم فيها الضواري بتطوير استراتيجياتٍ وتقنياتِ افتراسٍ أفضل، وتقوم الفرائسُ بعملٍ مماثلٍ. فالسنّ الحادّ هنا يستحثُّ جلداً أسمك أو قدماً أسرع في مكان ما، وهذا بدوره يستحثُّ سنًّا أكثر حدةً.

والانتقاء الطبيعي هو، أيضاً، مرآة للموقع. وثمة إيضاح مدهش لتأثير البيئة الفيزيائية في مسيرة الانتقاء الطبيعي، يتجلّى في البروز المستقل للكائنات الحية التي تكيّفت بوجهٍ مماثل في أجزاءٍ منفصلةٍ انفصالاً واسعاً من العالم. ولا يوجد مكانٌ في عملية التطور المتقاربة convergent evolution هذه أكثر إدهاشاً من بروز الحيوانات الجرابية (كالكنغر وأضرابه) للثدييات المشيميّة placental: ففي الأولى يتطور الجنين أساساً في كيس خارجي، وفي الثانية يتطور أساساً في الرّحم. لذا فإن الأنماط الجرابية من الثدييات تطوّرت عندما انفصلت أستراليا عن الأنتاركتيكا خلال الدهر الحديث Cenozoic era قبل نحو 65 مليون سنة، وتوجهت شمالاً، مثل سفينة نوح الضخمة، بنظام بيئي منعزل (الشكل 1-7). هذا وإن ذئب أمريكا الشمالية *(Canis lupus)*، وهو ثدييٌّ مشيميّ، يشبه في مظهره الذئبَ التّسمانيَّ الجرابيَّ *(Thylanicus cynocephalus)*. وقد أدى استكشافُ الانتقاء الطبيعي للبيئاتِ المتاحةِ إلى عدّةِ حلولٍ مشابهةٍ (الشكل 1-8): فالأسلوت الثديي - وهو حيوان أمريكي يشبه النمر - يشبه الهرّة النمريّة الجرابية *(Dasyurus maculatus)*؛ والسنجابُ الطائرُ *(Glaucomys volans)* يشبه سنجابَ العسل *(Petaurus breviseps)*، والمرموطُ *(Marmota monax)* يشبه الوُمْيَت *(Vombatus ursinus platyrrhinus)*، والخلدُ المألوفُ *(Scalopus aquaticus)*

الهند
أستراليا
الأوليغوسيني
الإيوسيني
البالايوسيني

الشكل 1-7. انفصلت أستراليا عن بقية غوندوانا قبل قرابة 60 مليون سنة، واندفعت باتجاه الشمال الشرقي حاملةً فوقها حيواناتِهَا المعزولةَ، التي خضعت لتطورٍ منعزلٍ في هذه الجزيرة الضخمة. وفي نفس الوقت تقريباً، اندفعت الهند شمالاً بعنفٍ وتحوّلت إلى أرضٍ قارّيّةٍ تقع عليها جبال الهمالايا.



الشكل 1-8. مع أن أستراليا (وأمريكا الجنوبية) كانت منعزلة، فقد تعين على التطور مواجهة مشكلات مماثلة، وأتى بحلول مشابهة. ويرى في هذا الشكل مثالين على حيوانين ثدييّنْ ومكافئيْهما الجرابيّيْن.

يشبهُ الخلدَ الجرابيَّ *(Notoryctes tryphlobs)*. وحتى الفأرُ المنزليُّ *(Mus musculus)* يشبهُ *doppelgänger*، وهو الفأر ذو القوائم الصفراء *(Antechinus flavipes)*.

يمكننا البدء بإدراك الارتباط البيني لكل ذلك بملاحظة أنه عندما برزت قناة

باناما البركانية قبل نحو 3.5 مليون سنة بين أمريكا الشمالية وأمريكا الجنوبية، اللتيْن كانتا قطعتين من لوراسيا Laurasia وغوندوانا Gondwana، على الترتيب، فإن هذا لم يسفر عن معاركَ بين الأنواع البينيّة فحسب، وذلك عندما قامت المجموعات الثديية في الشمال بالاتجاه جنوباً للقتال من أجل البقاء مع مجموعات الحيوانات الجرابية التي كانت تكثر في الجنوب، بل حدث أيضاً اضطرابٌ في دوران المحيطات أسفر عن انطلاق عصرٍ جليديٍّ عَدَّلَ البيئةَ النباتية والحيوانية لكوكبنا.

ومع ذلك، فإن الحرب التطورية ليست سوى مركِّبةٍ واحدة للقوة الدافعة للتغير، لأن التغيرات في البيئة الفيزيائية تؤدّي أيضاً دوراً مركزيًّا في دفع التطور. وتضم هذه التغيرات تفريغ بيئات عن طريق الانقراض الجماعي، وهذا مما يسمح بتطوير مجموعات جديدة من الساكنين. الكارثية catastrophism، وهي الفكرة القائلة إن العالَمَ معرّضٌ لدمارٍ مفاجىءٍ، كما ورد في أسطورة طوفان نوح، كانت قوةَ التغيّر التي أيّدها عالمُ النبات الفرنسي ذو التأثير القوي جدًّا، ومؤسّسُ علم الأحافير الفقارية Vertebrate paleontology، البارون جورج ليوبولد كريتيان فريديريك داغوبير كوفييه G. L. C. ,F. D. Cuvier (1769-1832)، الذي كان عدد أسمائه الأولى تعادل عدد أسماء العصور الجيولوجية، لكنه أُهمل بعد تأسيس علم الجيولوجيا. وقد بدأ قبول الجيولوجيا بفضل جيمس هتّون J. Hutton (1726-1797) عن طريق كتاب نظرية الأرض Theory of the Earth (1795)، الذي نشره سير تشارلز ليل Sir C. Lyell (1797-1875) في ثلاثة مجلدات بعنوان مبادىء الجيولوجيا Principles of Geology (1830-1833؛ وقد حمل داروين نسخةً منها عندما كان على متن السفينة بيغل). وقد أيد هتّون وليل مبدأ الوتيرة الواحدة (مبدأ الاطّراد) uniformitarianism، الذي ينص على أن الطبيعة الفيزيائية للأرض تُعتَبرُ، بناءً على القدر الكبير من الأدلة التي يزوِّدنا بها تحليل طبقاتها، أنها مرّت بتحوّل بطيء ومستقر. لكننا نعرف الآن أنه حدثت كوارث فعلاً، أشهرها صدم الأرض بنيزك قضى بنجاحٍ على جميع الديناصورات التي لم تكن مرنةً جينيًّا

بقدرٍ كافٍ. وقد قَضَتْ هذه المخلوقاتُ الضخمةُ نتيجةَ الافتقار إلى النموّ النباتي نتيجةَ الليلِ الحالكِ الذي لفّ الأرضَ بسبب الغبار الذي نجم من صدم النيزك، أو ربما بسبب احتراق هذه المخلوقات في عالَم كان تركيز الأكسجين الجوي فيه أعلى بكثير مما هو عليه الآن. وقد فتح انقراضُها البابَ لموجةٍ من الثدييات[4].

سنكون بحاجةٍ إلى الرجوع إلى بعض الأدوار والحِقَبِ الجيولوجية التي قُسِّمَ فيها تاريخ كوكبنا البلاستيكي (الشكل 1-9). ومع أن أسماءها حُدّدت بشيء من عدم الدقة، لكن إسميْ ويلز ووِسْتْ كنتري West Country (في إنكلترا) أسهما جيّداً في هذا الصدد: فكامبريا Cambria (ومنها الدور الكمبريّ Cambrian) وهو اسم قديم لويلز؛ وأردوفيشيز Ordivices وسيلوريس Silures (ومنهما الدور الأُردوفيشيّ والدور السيلوريّ) اسمان قديمان لقبيلتَيْن من ويلز قبل العهد الروماني، ومن ديفون Devon جاء الدور الديفونيّ. إن لأسماءِ العصورِ التي تقسَّمُ إليها بعضُ الحقب الجيولوجيّة أشكالاً مشوشة إلى حدٍّ ما: وهي تضم الباليوسيني Palaeocene (حديث قديم)، والأيوسيني (فجر حديث)، Oligocene (قليل من الحديث). وسأضيف، بين قوسين، أن أصول كلمة أسماءٍ أخرى، باستثناء بقايا محاولةٍ مبكّرةٍ لتسميةِ الأدوار بطريقة منهجية، تبين غرابة الأصول التي اشتُقت منها أسماء بعض الأدوار؛ ومن هذه الأدوار الدور الترياسي Triassic، والدّور الثالث Tertiary، والدّور الرابع Quaternary.

إن انقراض الديناصورات في نهاية الدّور الطباشيري هو الوحيد بين خمسة على الأقل من الأحداث العظمى. وفي الحدث المأساوي الذي أنهى الدّورَ البرمي Permian (Perm، بلدة في شرق روسيا)، انقرض أكثر من 95 بالمئة من أنواع الحيوانات البحرية. وقد انتهى الدّور الأُردوفيشيّ بسرعةٍ قَبْلَ 250 مليون سنة، والدّورُ الترياسيُّ قبل 350 مليون سنة، والطباشيريُّ قبل

(4) إذا كانت الطيور تحدّرَتْ من الديناصورات، وهذا اعتقادٌ يتعاظم بين الناس، فإن دراسة الديناصورات أثبتت، على وجه مذهل، أنها رجوعية، وقد تعود إلى الحياة كما كانت.

65 مليون سنة. هذا وإن أسباب معظم هذه الانقراضات مازالت مجهولة إلى حد بعيد، لكن لا يوجد نقص في الآراء، ومن ضمنها صدمات النيازك، والانخفاض الشديد لمستويات سطح البحر الذي رافق البرودة التي حلت بالأرض. هذه الانقراضات رهيبة، لكنّ الحياةَ مرنةٌ جدًّا، وتعدُّدُ الأنواعِ يعودُ إلى ما كان عليه بسرعة عالية: فبعد 5 إلى 10 ملايين سنة، يعود هذا التنوع إلى مستوياته التي سادت قبل الانقراض، بل إنه غالباً ما يتعدّاها. الانقراض يكتسح المتنافسين، ويأتي ببيئاتٍ ناضجةٍ للاستيطان، ويُعتبرُ فرصةً ذهبيّةً (وهذه الفرصة تستثني المنقرضين). ومع ذلك، فبالرغم من أهمية حوادث الانقراض، فلا يجب المبالغة في ذلك. فالنوع الحيوانيّ النموذجيّ يستمر طوال نحو مليوني سنة، لكن الانقراضات تحدث نموذجيًّا كل 20-30 مليون سنة، لذا فإن معظم الأنواع لم تنقرض بفعل كارثةٍ. ومن سوء حظ الديناصورات أنها كانت ناجحة، بمعنى أنها عاشت مدة طويلة قبل تعرضها للانقراض.

وحاليًّا، يبدو أننا موجودون في وسط نوع جديد من الانقراض، حيث تقدّم البشريةُ إلى المحيط الحيويِّ نشاطاتٍ غيرَ ملائمةٍ للبيئةِ التي يعيش فيها البشر، وربما كانت هذه النشاطات تعود بالأذى على البشرية ذاتها. إن الانقراض المُسْتَحَثَّ ذاتياً self-induced من هذا النوع قد يَكون حالةً ملازمة من «التقدّم» يتعذّر تفاديها، لأنه، من وجهة نظرٍ مالتوسيّةٍ محدّثةٍ مفرطةٍ في التشاؤم، فقد تَبُزُّ القدرةُ على الإبادة الذاتية تطَوُّرَ الذكاء. وأكثر وجهةِ نظرٍ تشاؤماً هي أنه برغم إمكان المجتمعات أن تبقَى على قيد الحياة عندما يمكن للأفراد قتل بضعة آلاف فقط بضربة واحدة، فلا يمكن لمجتمع أن يظل حيًّا عندما تتطور التِّقانةُ إلى درجةٍ يملك فيها فردٌ وحيدٌ السلطة لقتل عشرات الملايين، وقد يكون المجتمعُ البشريُّ بلغ هذه الدرجة. وإذا كانت هذه قاعدةً عامةً للمجتمعات الموجودة على كوكبنا كلِّه، فثمة بصيصُ أَمَلٍ في أن نحقّقَ الطموحاتِ الكونيةَ للبشريةِ، كما توحي بذلك قصص الخيال العلمي المتفائلة، لكن انقراضنا، على الأقل، سيتيح فرصاً للصراصير.

قبل ملايين السنين	الدهر	الدور	الحقبة	الأحداث الرئيسية
الآن				
0.01	السينوزوي	الرّابع	الهولوسين	
2			البلايستوسين	العصور الجليدية، انقراض الحيوانات الضخمة
5		Neogene	البيلوسين	الإنسان المبكر (الأول)
25			الميكوسين	
35		Palaeogene / الثالث	الأوليغوسين	
55			الإيوسين	
65			الباليوسين	الثدييات المبكرة
145	الميزوزوي	الطباشيريّ		
205		الجوراسيّ		الطيور والثدييات الأولى
250		الترياسيّ		الديناصورات الأولى
290		البرميّ		انقراض اللافقاريات
350		الكربونيّ		الزواحف الأولى
400	الباليوزوي	الديفونيّ		البرمائيات الأولى، الغابات الأولى
440		السيلوريّ		الحيوانات هوائية التنفس الأولى، نباتات الأرض
500		الأردوفيشيّ		الفقاريات الأولى
540		الكمبريّ		
700				الحيوانات الأولى
3400				الكائنات الحية الأولى
4600				تكوّن الأرض

الشكل 1-9. العصور الجيولوجية على الأرض، مع الأسماء التي أعطيت إلى الدهور والأدوار والحقب، التي قُسِّمَ كلّ منها. وقد أوردنا بعض الأحداث الكبرى في العمود الأيسر. العصور العددية ليست سوى دليل، وهي تختلف من مصدرٍ إلى آخر.

وفيما يتعلق بجميع التفاعلات الغنية بين الجغرافيا والجينات، يبقى لدينا عدة أسئلة مركزية. أحدها طبيعة الكيان الذي يجري عليه الانتقاء الطبيعي. فهل يجري على الجينات، أو الأفراد، أو الأنواع؟

يمكننا استبعاد الأنواع بوصفها وحدةً للانتقاء. إن الكائنات الحية لا تفعل شيئاً نيابةً عن أنواعها. وكما أن الانتقاء الطبيعي لا يرى المستقبل، فهو، أيضاً، لا يرى الجماعة والعشيرة Clan. الفرد يتنافس مع أفرادٍ آخرين، وهو يُدفع إلى السعي لنجاحه بقطع النظر عمّا هو جيد لمجموعة الكائنات الحية التي تؤلّف الأنواع. ويتجلّى الدافع التناسلي للفرد في السلوك الأناني، ولا يملك مفهوم الإيثار altruism، وهو سلوكٌ غيرُ واعٍ يؤدي إلى الجُود بالنفس نيابةً عن الآخرين[5]. وهذا لا يعني أنّ ثمةَ أنواعاً كثيرةً من السلوك لا تبدو إيثاريّةً ـ ما نعنيه فقط هو أننا عندما نتفحصها بتأنٍّ ورويَّةٍ، نكتشف أنها ذئاب في ثياب قطيع من الغنم، وأنّ الإيثار هو أنانيةٌ ذاتُ أسنان ومخالب. وفي الإيثارِ المتبادَلِ reciprocal altruism الكامِن في العَقدِ الاجتماعيّ الذي يحكم المجتمع البشريّ المثاليّ، ينغمس الكائن الحي في الأنانية عن طريق التعاون مع كائنات حيّةٍ أخرى في مقياس واسع، ذلك أن الذي يقدّم المساعدة في الأيام الصعبة قد يحتاج إليها.

وفي مستوى أعلى، نحن بحاجةٍ إلى فهم أن أعضاء نوعٍ يتقاسمون جيناتٍ، وأن تقديم مساعدةٍ لمنافسٍ على التناسل يؤدي إلى أن يقوم كائنٌ حيٌّ بتسهيل تكاثر جيناته. يُسمّى هذا النمط من الإيثار انتقاء الأقارب kin selection. وهكذا، فإن عالم البيولوجيا النظرية هالدين J. B. S. Haldane (1892-1964) عبّر عن الفكرة بأنه سيكون مسروراً بغَرَقِهِ إذا كانت نتيجة ذلك إنقاذ أخوين له أو عشرة من أبناء عمومته. فكلٌّ من أخويه سيقاسمه نصف جيناته؛ أما أولاد عمومته فسيقاسمونه ثُمْنَ جيناته (وهكذا فإنقاذ ثمانيةٍ من أبناء عمومته يؤدي إلى تعادل الجينات، وإنقاذ عشرة سيكون في مصلحة «جيناته»). إن تعلُّق جيناتنا

(5) لاحظ أن الإيثار والأنانية في السلوك البشري هما عادةً نشاطان واعيان؛ وهما في علم الوراثة تصنيفان للسلوك غير الواعي، والغريزي، والمبرمَج.

بسلوكنا يوحي بأنه علينا النظر دون مستوى النوع، ودون مستوى الفرد، والنظر في عمق الجينات.

إحدى مشكلات هذه الفكرة هي أنه نادراً ما يوجد تقابلٌ واحد إلى واحد one-to-one correspondence مع السلوك. فليس المحيط الحيويُّ وحدهُ مؤامرةً للتعقيد، لكنْ هناك أيضاً ظهورُ النّمط الجينيّ genotype (التركيب الجيني لكائن حيّ) في النمط الظاهريِّ phenotype (السّمات الفيزيائية للكائن الحيّ). ستتنكر بعض الكائناتِ الحيّةِ ذاتُها بحجةَ التناسل، لكنها، مع ذلك، تُسهم في المستقبل عن طريق مساعدةِ القريبين جدًّا منها على التناسل بدلاً منها. إن جينات ملكتهم قريبة جدًّا من جيناتهم إلى درجة تجعلهم يُنجزون تكاثر جيناتهم الخاصة بهم بواسطة تسهيل تناسلها بدلاً منهم: إذ يمكنها أن تنتج كثيراً من النسخ المطابقة لجيناتهم دون أن تدفعهم أن يقوموا بذلك بأنفسهم.

ثمة مشكلة أخرى هي تعقّب نتائج التنافس في مستوى (فرديٍّ، مثلاً) لبلوغ مستوى أعلى (النوع). وقد يحدث أن تكون فائدةٌ لفردٍ ضارة بالمجموعة. ولأن الفرد لا يملك بصيرة تطوّرية، فيسهل نتائجَ سلوكه الخاصّ لمصلحة المجموعة. فعندما يكون الغذاء نادراً، يواصل بعض الأفراد التناسُلَ ونقل جيناتهم إلى الأجيال اللاحقة؛ إنهم لن يمتنعوا عن ذلك نيابةً عن النوع. وبالنتيجة، يتطوّرُ النوعُ بالاتجاه الذي يحدده التدفقُ الجينيُّ لمستخرجي النسخِ المطابقَةِ الأنانيّين. وفي البيولوجيا التطورية الحديثة، فإن انتقاء الزمرة group selection، أي الانتقاء بمستوى النوعِ أو زمرةٍ مساويةٍ من الأفراد، شيء مُسْتَنْكَرٌ: فالانتقاء الطبيعيّ يحدث في مستوىً أخفض، ثم إن جميع النّزعات التطوّرية، التي تَظْهَرُ لتشير إلى الانتقاءِ بين الأنواع، يمكن تعقّبها عادةً للوصول إلى نتيجةٍ لانتقاء بمستوى أخفض. وفي الحقيقة، فإذا اشترطنا أننا نستثني الحالة الخاصة للانتقاء القريب، فلا وجود لأمثلة محدّدة لتكيّفاتٍ تفيد بوضوحِ الزمرةَ: وهكذا، لا وجود لاقتناع في الشعار «من أجل فائدة النوع».

يمكن التعبير عن مشكلةِ وحدةِ الانتقاءِ بطريقةٍ مختلفةٍ، لأن الانتقاء يكون أعظميًّا في مستوى معيَّنٍ. وفي أدنى مستوى في الوجود، في مستوى الذرات، لا أهمية لمن يقتل من، لأن كل الذرات تنجو من الجريمةِ، والتشويهِ الدائم، والمذبحةِ، وفي مستوى أعلى كثيراً، لنأخذ مملكة الحيوان Animalia، وهنا أيضاً لا يهمنا من يذبح من، لأن المملكة تبقى على قيد الحياة بقطع النظر عن تركيبها المتغيّر. إن أثر البقاء على قيد الحياة أهمّ بكثير عندما نبلغُ مستوَى الأفراد وجيناتهم، لأن الفرق بين القاتل والمقتول مهمٌّ جدًّا الآن، فإذا زدنا المقياس قليلاً، فإننا نصل إلى نوعٍ بحيث يؤثر قطعاً موتُ فردٍ في مستقبلِ النوعِ، لأنّ من الأفضلِ عادةً وجودَ كثيرٍ من المتناسلين قدْرَ الإمكان، ويكون بقاؤك حيًّا إسهاماً، شريطة أن تكون قادراً تناسليًّا. إن صنف ذوات الأثداء Mammalia يحتمل بقدر أقل قليلاً أن تظل حية إذا كان مقدِّم الطعام حيواناً ثدييًّا ولم يكن الطعام كذلك، لكنْ أنْ يأكلَ كلبٌ كلباً - وعموماً، أن يأكل كل حيوانٌ ثدييٌّ ثدييًّا - فشيءٌ متعادلٌ تقريباً. وإذا تحركنا بالاتجاه المعاكس، نزولاً في السُّلَّم عن الفرد، فإننا نقابل جيناته، التي هي بصمة الفرد والنوع. تُرى، هل عشاء جينات شخص آخر أكثر أو أقل أهمية من عشاء الشخص الآخر؟

إحدى الطرائق لتحديد وحدة الانتقاء هي تعيين الكيان الذي يُحتمل أن يكون خالداً. الذرّات خالدة، لكنها ممثلاتُ امبراطوريةِ المعادنِ، وليست امبراطورية الكائنات الحية. إن المركّباتِ التي يتكوّن منها لولب الدّنا DNA المزدوج («القواعد النويدات» التي سندرسها في الفصل 2) غير حيّة ذاتيًّا، تماماً مثلما لا تشكِّل حروفُ الأبجديةِ أدباً. وحتى لو كانت هذه المركّباتُ خالدةً، فلن تُعتَبَرَ حَيَّةً. هذا وإن الجينوم البشري، وهو المكمّل الكليّ للدّنا في كل خليّة، ليس خالداً أيضاً، لأنه يقطَّع ويغيَّر في عمليةٍ تُسمّى إعادة اتّحاد الانقسام المنصّف meotic recombination، عندما يحدث التناسل الجنسي، حيث يُستعاض بجينةٍ عن أخرى (انظر الفصل 2 الذي تناقَشُ فيه هذه العملية أيضاً). لكننا قفزنا عن مستوىً: أي الجينة، وهي شريط ضيق من الدّنا نشيط تناسلياً. الجينة يُحتمل أن تكون خالدة - إلى أن تخضع لطفرة - لأنها تتحول من جينوم إلى جينوم، من فأر إلى

فأر، تحولاً لا تصاب فيه بأذًى عمليًّا[6]. هل هذه عندئذ هي وحدة الانتقاء؟ وفي الكتاب الذي عنوانه التكيُّف والانتقاء الطبيعي Adaptation and natural selection (1966)، يحاجّ جورج ويليامز G. Williams أنه يجب اعتبار الجينة بوصفها أيَّ جزءٍ من مادةٍ كروموزومية، يُحتمل أن تدومَ عدداً كبيراً من الأجيال لتقومَ مقامَ وحدةٍ للانتقاء الطبيعيّ. وفي الكتاب الشهير الجينة الأنانية The selfish gene الذي كتبه عالِمُ الحيوان بجامعة أكسفورد ريتشارد دوكنز R. Dawkins (المولود عام 1941)، طَوَّرَ المؤلفُ هذه الفكرةَ بطريقةٍ قاسيةٍ، واستشكف كيف أن الجينة، بسبب تصرّفها الأنانيّ، تنتشر في النظام الحيويّ biosystem وتحافظ على بقائها بالتكاثر.

ذكرتُ في المقدّمة أن العلم يعمِّقُ، في الحالة النموذجيّة، تبصّراته، ويوسِّعُ مجالَهُ عن طريق اعتماد مستوياتٍ أعلى للتجريد. ويمكن رؤية هذه النزعة في البيولوجيا. الانتقاء الطبيعيّ هو كومةٌ من أشياءَ طبيعيةٍ نستعملها لرعاية التجريد، ثم إن تحديد الجينة بوصفها وحدة الانتقاء هو خطوة جوهرية في هذا الاتجاه. وهكذا فإن دوكنز Dawkins يرى أن الانتقاء الطبيعي يَحْدُثُ في أدنى مستوًى لجميع الأشياء، وهو الجينة، ويعتبِرُ الكائن الحيَّ وِعَاءً تستعمله الجينةُ الأنانيةُ (أؤكد هذا القول، بمعنًى تقنيٍّ) لتؤكّد تكاثرها. فالجينة غير الواعية تشكِّل دون وعي وعاءَها، ونمطَها الظاهريَّ، لتتكيف قدر الإمكان مع بيئتها، لأن أفضل الأوعية تكيّفاً ستؤكد أن الجينة ستتكاثر.

وثمة مستوى أدنى للانتقاء، وهو حتى أكثر تجريداً من الجينة، ومن المحتمل أن يكون حتى أكثر خلوداً، الجينة تُرَمِّزُ encodes المعلومة ذات النمط الظاهري، مثل المعلومة عن شكل الجسم، أو سمته المميِّزة، أو التعديلاتِ الفيزيولوجيةِ اللازمةِ لتضخيمِ ارتفاعِ القهقهة. الجينةُ كيانٌ فيزيائيٌّ يجب تجديده عندما تنسخ عمليات الاستقلاب (الأيض) metabolism جُدَيْلاَتِ الدَّنا strands، وتؤكد أن النسخَ المطابقةَ تُمَرَّرُ إلى كل خلية وإلى الجيل التالي. وحتّى الجينة،

(6) أنا أقول «لا تُصاب فيه بأذًى عملياً» لأنه إذا حدثت انقطاعات عشوائية في الدّنا التي تحدث في وسط الجينة، فإن خطوة إعادة الاتحاد تعيد إنشاء الجينة في الجينوم الجديد.

بوصفها كياناً فيزيائياً، ليست خالدةً، لأن الجينة الفيزيائيةَ يجب إعادة بنائها على الدَّوام. وحقيقةُ كوْن المعلومةِ مرمّزةً encoded في الدَّنا هي تفصيلٌ، وهي تنفيذٌ لا أساسٌ. وعندما نعتبر الجينةَ وحدةَ الانتقاء، فإننا نركّز في الحقيقة على المعلومات التي تنقلها، وهي، تماماً مثل جسم الكائن الحيّ، وعاءٌ للجينة مُعَدٌّ للطّرح بعد الاستعمال disponsable، لذا فإن متتالية القواعد في الدَّنا هي تحقيق فيزيائي للمعلومة التي تحويها الجينة، وهي مُعَدَّةٌ للطرح بعد الاستعمال. المركَّبةُ الخالدةُ الحقيقيةُ للحياةِ ليست الجينة الفيزيائية، بل هي المعلومات المجرّدة التي تحويها. المعلومة خالدة، والمعلومة عاليةُ الأنانيّة. والمعلومة الجينيّةُ قد تكون الوحدةَ النهائيةَ للانتقاء، حيث يكون الدَّنا هو تجسيدَهَا، ويكون جسمٌ وعاءَها الثانويَّ القابلَ للطرح.

لقد برز العالَمُ الحيُّ عندما تعثّرت المادةُ غيرُ العضويّةِ على طريق يحرِّرُ معلومةً معقّدةً لا يمكن التنبؤُ بها، ووجد أنّ بإمكانه بلوغ الخلود لتلك المعلومة بواسطة تكرارها الذي لا يتوقف. وهنا تكمن ملكة حمراء Ted Queen أخرى تعدو بسرعةٍ، لأن الدوام لا يتحقق إلا بالتكرار المستمر. وبنفس الروح، فإن مستوى حياتنا المتحضِّرَ، والذكيَّ والتأمّليَّ، برز عندما تعثرت الكائناتُ الحيَّةُ في طريق تمرير معلومة معقَّدة لا يمكن التنبؤ بها إلى كائنات حية أخرى موجودة حولها وتتبعها. لقد فَعَلْتُ ذلك باختراع لغةٍ، وبربطِ جميع الكائنات الحية البشرية بعضها ببعض بفعاليّةٍ، الماضي والحاضر واللاحق منها، بكائنٍ حيٍّ ضخمٍ وحيدٍ ذي إنجازاتٍ محتملة لا حدّ لها.

●

ومع النجاح البلاغيِّ، لكنِ المخلَص، الذي خلّفناه وراءنا، فقد حان الوقت للنزول إلى الجنس sex. إن إحدى أكثر السّمات إذهالاً للانتقاء الطبيعي هو تطوُّرُ التناسلِ الجنسيِّ. وللوهلةِ الأولى، يبدو الجنسُ فكرةً جيدةً، بمعنى أنه يمنح النوعَ مرونةً جينيّةً واستجابةً سريعةً للظروف المتغيرة. بيد أن ثمة مشكلاتٍ لا بدّ من إيرادها.

أوّلها أن الجنسَ غيرُ ضروريٍّ، فثمة قليل من الأنواع التي تفلح في تدبّر أمرها تماماً بدونه. فالتوالد العذري parthenogenesis شائع بين النباتات، حيث يسمى على وجه خاص الإثمار اللاإلقاحي parthenocarpy. وقد سبق لنا ذكر الهندباء البرية التي تثمر بدون إلقاح، لكنْ يمكن إضافة نباتاتٍ شائعةٍ أخرى، مثل ثَمَرِ العلّيق *(Rubus)* ومعطفِ السيدات *(Alchemilla)*. وتتكاثر بعض الزواحف لاجنسيًّا، ومن أشهرها سحليّات العالم الجديد *New World lizards* من الجنس المسمّى *Cnemidophorus*، وسحليّات العالم القديم من الجنس *Lacerta*، والثعبان الأعمى المسمى *Ramphotyphlolps braminus* من فصيلة *Typhlopidae*. هذا ولا وجود لثدييات تتكاثر لاجنسياً، برغم تأكيدات العهد القديم عكسَ ذلك.

ثانياً، الجنس غير مستقرّ. لنفترض أن نوعاً معيناً يتكاثر جنسياً، ويخلّف ذريّةً كبيرةً، نصفها ذكور، والنصف الآخر إناث. وكي تظل الجماعة ثابتةً تقريباً، فإن جميع أفراد الذرية يموتون باستثناء نحو اثنيْن منها، أحدهما ذكر والآخر أنثى. لنفترض الآن حدوثَ طفرةٍ في أنثى، وأن باستطاعتها الولادةَ لاجنسيًّا asexually. ومرةً أخرى، ستُنشىءُ ذريةً كثيرةَ العددِ، سيبقى على قيد الحياة نحو اثنيْن منها. لكن هذه الذرّيّة، نظراً إلى كونها نَسَائِلَ clones الأم، فكلاهما أنثى. ويمكنها كلتاهما التوالد عذريًّا، وهذا يزيد من عدد الإناث، وإذا وَلَدَتْ أنثى عزباءُ لاجنسيًّا نفسَ العدد من الذرية مثل الزَّوْجِ الذي يتوالد جنسيًّا (هذا افتراض قابل للجدل بالطبع، لأنه غالباً ما يكون للآباء أدوارٌ بعد الجماع)، فبعد بضعة أجيال، فإن مجموعة الإناث التي تتوالد عذرياً ستكون قد غمرت المجموعة البدائية. لا بد من وجود فائدة موازنة للجنس الذي يضمن الاستقرار.

ثالثاً، الجنس جداً معقد، ويتوقف التكاثر الجنسي على آلية معقَّدة للانقسام المنصِّف meiosis، حيث يُنَصَّفُ، كما سنرى في الفصل 2، عدد الكروموسومات في خلايا خط الجراثيم germ-line (الأعراس gametes، والنّطاف sperms والبيضة)، لكنها تعادُ إلى عدد خلاياها الجسدية عند التلقيح. تُرى، ما هي الضغوط الانتقائية ذات القوة العالية استثنائياً التي تؤدي إلى تطور هذه الآلية المعقَّدة؟ لا يوجد شيء غير عادي يتعلق بتطور الآليات بواسطة تعديل السّمات

التشريحية والكيميائية الحيوية الموجودة سابقاً ـ وكمثالٍ نورد المرَّاتِ الكثيرةَ التي تطوّرت فيها العين بطريقة مستقلة ـ لكن، كما هو الحال في امتلاك عين، لا بد من وجود مكافأة مثيرة جدًّا، وهي عرضٌ للكائن الحي لا يسعه رفضه.

إن عالم البيولوجيا وليام هاملتون W. Hamilton (1936-2000)، الذي يعتبره ريتشارد دوكنز R. Dawkins مرشحاً ليكون أعظم الداروينيين منذ داروين، ظن أنه حدّد المكافأة. كان هاملتون شديد الاهتمام بالطفيليات parasites. وقبل وقتٍ ليس بالطويلِ من مرضه نتيجة إصابته بالملاريا، ارتأى أن الجنس يمكّن الكائنَ الحيَّ من أن يسبقَ الطفيليات، التي كان الكائن فريسةً لها، بخطوةٍ. إن التطور المشترك للطفيلي والمُضيف، اللذيْن كان كلٌّ منهما يوفّر بيئةً سريعةَ التغيّرِ لتطورِ الآخَرِ، يتطلب نوعاً سريعاً وخاصاً من الاستجابة، التي كان يوفرها الجنس. إن التحليلَ المتأنِّيَ لديناميّاتِ التعايش، الذي يشبه مناورات الدول خلال الحرب الباردة، يبيّن أن الجنسَ يوفر فائدة، لأنه يوفر آليةً لخزن المعلومات الجينية التي أصبحت زائدة عن الحاجة، لكن قد تُحْتَاجُ مرةً أخرى عندما يكون النمط الجينيُّ قد عاد إلى تحسيد سابقٍ. وبعبارةٍ أخرى، فإن الجنس يوفّر مخزناً من السّيوف في وجه بنادقَ، لكن البنادقَ قد تَنْفَذَ ذخيرتُها. السيوف المخزونة عديمةُ الفائدة مع ذلك، إذا فَسَحَتِ البنادقُ المجالَ للأسلحةِ النووية، أي أن الجنس يكون عديم الفائدة إذا طوّر الطفيليُّ استراتيجيةً جديدةً بدلاً من العودة إلى استراتيجية سابقة. وتظل هذه النظرية مشكوكاً فيها، ذلك أن من الصعب إثباتَهَا تجريبيًّا، ثم إنها تعتمدُ على علاقة تطوّريةٍ خاصةٍ بين الطفيليّ والمُضيف.

من الأسهل تحديدُ الآليات التي تستديم الجنس بدلاً من الآليات التي نشأ منها العملُ المعقّد. أولاً، إن المجموعاتِ التي تتكاثر جنسياً أكثرُ استجابةً للتعديلاتِ في البيئة من المجموعاتِ العذريّة التوالد. وهكذا فإن الطفراتِ المفيدةَ يمكن أن تَحْدُثَ في كلٍّ من الأبوين على حدةٍ، وتَمنحُ ميزةً تناسليّةً لذريتهما؛ وفي التوالد العذري، يجب أن تعقُبَ طفرةٌ طفرةً أخرى، أي أن الطفرةَ يمكن حدوثها بالتوازي في المجموعات الجنسية، لكن بالتسلسل في المجموعات

اللاجنسية. ثانياً، إن الطفراتِ المؤذيَة أقلُّ احتمالاً للتوالد في المجموعات الجنسية، لأن أبويْن مريضيْن يمكن أن ينجبا طفلاً طبيعيًّا (كما سيتضح من وجهة نظرية مندل في الوراثة، الفصل 2)، في حين أنه لا يمكن لكائنٍ حيٍّ يتكاثرُ لاجنسيًّا أن يخلِّصَ نفسَهُ من طفرةٍ سيّئةٍ إلاّ بمروره بطفرةٍ عكسية back-mutation لنفسِ الجينة، وهذا شيء غير محتمل. إن ازدواج الشكل الجنسي sexual dimorphism (المظهر المختلف للذكور والإناث من نفس النوع) سهّل التفسير أيضاً، وبخاصة المظاهر المتطرفة التي تميز الذكر غالباً. وعلى سبيل المثال، فإن هاملتون، في إحدى نتائج نظريته في تطور الجنس، يرى أن مظهر الذكر ذي الخطوط المتوّجة هو علاقةٌ على أنه بصحةٍ جيّدةٍ وخالٍ من الطفيليّات. وتَفَحُّصُ الذّكَرِ من قِبَلِ الأنثى - الذي نسميه نحن البشر «الوقوع في الحبّ» - هو عندئذٍ مماثلٌ للفحص الطبيّ.

ويبدو أن الجنس يمنح ميزاتٍ بمستويات مختلفة: السكان، والأفراد، والجينات. ومعظم الانتقالات التطورية لا تعطي إلاّ ميزاتٍ ضئيلةً: الدَّفْعُ مقابل الجنس، ويجب عندئذٍ أن تكون الفائدة كبيرة. لماذا يتعيّن وجود أيٍّ فائدة من مزج جينات غريب ليس له علاقة بك مع جيناتك؟ ومع ذلك، فالنقطة الجوهريّة هي أنّ أصل الجنس، شأنُه شأنُ المسافاتِ التي يجبُ أن تقطعَهَا الكائنات الحيّةُ لتحقيقه، مازال سرًّا غامضاً.

●

وانطلاقاً من الشعور بأن كرتنا الأرضيّة تحرّكت، لنذهب إلى الأرض المتحركة فعلاً. الشيء الذي كان فيه لعمليات الألواح التكتونية أعمقُ أثرٍ في وجودنا هو التغيّرات الدقيقة التي حدثت في القشرة الإفريقية التي صارت تتموّج في رد فعلها على الضغوط التي تعرّضت لها عندما كانت تجول في نصف الكرة الجنوبي.

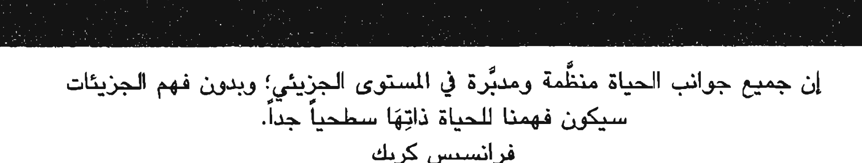
وقبل نحو 20 مليون سنة، كانت الأرضُ الإفريقيةُ شديدةَ الانبساط، ومغطّاةً على امتداد عرضها بغاباتٍ إستوائيةٍ. ثم تحرّكتِ الأرضُ. ولا بدّ أن تكونَ قد بدأْتَ بملاحظة الفرق قبل نحو 15 مليون سنة، عندما أحدث ارتفاع محلِّيٌّ

للأرض مناطقَ مرتفعةً من الحِمَمِ اللاّبِيَّةِ lava التي تمركزتْ في المنطقة التي نسمّيها الآن غينيا وإثيوبيا. لقد شكَّلَتْ هذه الأراضي المرتفعةُ موقعاً حسّاساً، لأن الأرضَ التي تحتها كانت تبتعد عنها. وعندما اتسعت الفجوة بينها، انهارت الأراضي المرتفعة لتولّد صدعاً عميقاً وطويلاً، وهو وادي الصدع العظيم Great Rift Valley، الذي يمتد الآن من موازمبيق الحديثة، قرب إثيوبيا، وصولاً إلى البحر الأحمر ثم إلى سوريا. وهذه الأراضي المرتفعة المكوّنة حديثاً تُحدثُ ساتراً من الأمطار على الجزء الشرقي من القارة، ثم إن الغابة الإستوائية تآكّلت تدريجيًّا لتصبح أرضاً معشوشبةً تحوي أشجاراً متناثرة. وتوفر الأرض الآن تنوعاً غنيًّا لبيئاتٍ محتملَةٍ من مناطقَ رطبةٍ وحارّةٍ وغنيّةٍ بالنباتاتِ في بعض المواقع، وأرضٍ جافّةٍ قاحلةٍ في أخرى. هذا ولم تكن البيئات وحدها مفتوحةً للاستكشاف، بل كانت العزلةُ التناسلية مفتوحةً للاستكشاف والاستثمار، لأن تنوعاً واحداً من الكائنات الحية كان غيرَ قادرٍ على الهجرة عبر الحواجز الطبيعية التي نشأت. وهكذا كانت الكائنات الحية محجوزة.

ومع ذلك، فإن البشر، عندما لا يكونون منخرطين في حروبٍ، صاروا الآن يهتمون بالتفكيرِ في بيئتهم، وبطبيعتهم الجسميّةِ والنفسيّةِ، وبتركيبِ الموادِّ المحيطةِ بهم، التي تعلّموا ببطءٍ إعمالَ إرادتهم لاتّقاء شرّها. وما يلي هو إتمامٌ لما أوصلتْنا إليه هذه المقدّمة.

الفصل 2

عَقْلَنة البيولوجيا(*)



إن جميع جوانب الحياة منظَّمة ومدبَّرة في المستوى الجزيئي؛ وبدون فهم الجزيئات سيكون فهمنا للحياة ذاتِهَا سطحياً جداً.

فرانسيس كريك

إنَّ كلَّ واحد منَّا مؤلَّف من نحو مئةِ تريليون نَفْسٍ. فكلُّ خليَّة من خلايانا ـ التي يبلغ تعدادها مئة تريليون تقريباً، والتي يعتبر معظمها صغيراً جداً بحيث يلزمُ نحو مئتين منها لتشكيل نقطة واحدة فوق أحد الحروف، تحتوي على طبعة لكامل جسمنا. مبدئياً ـ وهي كلمة مثيرة دائماً للريبة الشديدة ـ فإن جسمك، المقسّم إلى مئة تريليون خلية، ينتج مئة تريليون نسخة منك يمكن أن تتشظى كل منها إلى مئة تريليون خلية أخرى، سرعان ما تملأ، أنت والكائنات الجديدة، الكوْن كلَّه. لكنْ، ولحسن الحظّ، هناك ضوابط وقيود فيزيائية وبيولوجية تمنع حصول ذلك وتجعله مستحيلاً. ومع ذلك، فإن مجرّد التفكير في هذا الاحتمال يشير إلى أننا نلمّ بالطبيعة الخلوية للحياة إلماماً لم يسبق له مثيل.

نحن نعرف ذلك. أما داروين ومعاصروه، ربما باستثناء راهب واحد، فكانوا لا يعرفون شيئاً عن طبيعة الوراثة. وهم، بالرغم من إدراكِهِمْ للعالم الطبيعي

(*) قامت هيئة التحرير في أكاديميا إنترناشيونال بترجمة هذا الفصل.

ونفاذ بصيرتهم في تبعات التنافس، فإن فهمهم كان مشلولاً نتيجة جهلهم لآليَّة التوارث. وكانت أكثر آلية مقبولة في ذلك الوقت آلية التوارث التمازجيّ blending inheritance، وهو توارث تكون فيه صفات النَّسْل مزيجاً من صفات الأبوَيْن. وهذا التمازج، الذي لا يدعم الانتقاء الطبيعي بسبب التغلُّب السريع على التكيُّفات الجديدة، كان يُستخدم حُجَّةً قويَّة في دَحْضِ آراء داروين ويعيق القبول العام بنظريته. أما أرسطوطاليس، الذي كان رائعاً في سعيه لحلّ المسائل، فقد حصل على الجواب الخاطىء، وهذا يُبيِّن مرَّة ثانية فشل التخمين غير المدعَّم بالتجربة[1]. فلمّا كان الدم يسري في جميع أعضاء الجسم، عزا أرسطوطاليس الوراثة إلى الدم، وهو رأي لا يزال يُستخدم حتى الآن كاستعارة مجازيَّة. وكان أرسطوطاليس يعتبر المني دماً مُنقّى يمتزج، عند المجامعة، بدم الحيض ليهبَ الحياة إلى الجيل القادم.

أما الراهب الذي أمسك بالمفتاح فكان، بالطبع، غريغور مندل (1822–1884) Gregor Mendel، المولود يوحان لعائلة فلاحين في مزرعة في هاينزندورف، شمالي مورافيا، وهي مقاطعة في سيليزيا النمساوية ألحقت فيما بعد بتشيكوسلوفاكيا وهي الآن تابعة لجمهورية تشيكيا. وكان والد مندل، أنطون، مزارعاً صغيراً أفنى حياته وصحته في علم النبات. باع أنطون المزرعة إلى صهره ليتمكَّن من تسديد الرسوم لتعليم ابنه الذي سيكرِّس حياته لعلم النبات في مدرسة في مدينة تروبو، وبعد ذلك في الجامعة في أولمتز. وكان السبيلُ الوحيدُ أمام مندل ليكملَ تعليماً غير مكلف الدخولَ إلى دير سان توماس الأوغسطيني في برون، حيث اتّخذ اسم غريغور، في سن الثانية والعشرين، وسُميَ كاهناً عام 1847. وفي خطوة لتحضير نفسه لعلم الحساب البسيط الخاص بالوراثة، الذي سيعمل على تطويره في وقت لاحق، أُرسِلَ إلى فيينا لدراسة العلوم والرياضيات كي يصبح مدرِّساً؛ لكن دراساته هناك كانت ضعيفة، وخصوصاً في علم الأحياء، فعاد بعد سنتين إلى ديره ليصبح رئيساً له (عام 1868).

(1) إن التفكير النظري، مقروناً بالتجربة، يتمتعان قطعاً بقوة استثنائية، لأنهما يشغلان موقع القلب في المنهج العلمي.

شغل مندل وظائف في أسقفية النظام الإمبراطوري والملكي للإمبراطور فرانز جوزيف، وعُيِّنَ مديراً للبنك المورافي للتسليف العقاري، وهو مؤسّس الجمعية النمساوية للأرصاد الجويّة، وعضو في الجمعية الملكية الإمبراطورية المورافية والسيليزية لتشجيع الزراعة والعلوم الطبيعية ومعرفة الريف - والأهم من كل ذلك، كان بُستانياً. في خمسينيات القرن التاسع عشر، أي تقريباً في الوقت الذي كان فيه داروين يسطِّر أفكاره، بدأ مندل بالدراسات التي أكسبته شهرة بعد وفاته. وقد أثير حول صحَّة عمله أو عمل مساعديه عدد من المسائل التي دُحِضت بقوة - بعد أن برهن عالم الإحصاء والوراثة المتميِّز رونالد إيلمر فيشر (1890–1962) Ronald Aylmer Fisher، في العام 1936، أن الأرقام التي قدَّمها مندل كان مشكوكاً بأمرها، وقد طُرِحت أيضاً مسائل أخرى حول ما إذا كان مندل يعلم حقيقة ماذا كان يفعل، وما إذا كانت الأسطورة التي نُسِبتْ إلى إنجازاته نتجت من جهلنا بالموضوع لا من معرفته ونفاذ بصيرته. لذلك، كان جوهرُ أعمال مندل محاولةَ فهم قواعد التهجين بدلاً من آلية الوراثة. وكان دافعه تتبُّع وجهة النظر السائدة آنذاك بأن أنواعاً جديدة تنشأ من التهجين، باعتبار «الخيول المهجّنة» أنواعاً جديدة. وكان يسعى بيأس لخلق أنواع جديدة: وهنا كان فشله الكبير.

قدَّم مندل نتائج أبحاثه - وهي، في الحقيقة، تقرير كئيب عن فشله - في اجتماعات جمعية التاريخ الطبيعي في برون، وذلك في جلستين عقدتا بتاريخ 8 شباط/فبراير و8 آذار/مارس من عام 1865. وقد نشرت بوصفها «تجارب على الهُجُن النباتية» في محضر الجمعية في العام 1866. وقد جرى تجاهل نتائج أبحاثه تماماً، باستثناء اقتباس مضلِّل نشر في العام 1881، ولم يأت أحد على ذكرها حتى عام 1900. ولعل تجاهلها ناجم عن النظرة آنذاك بأنها تمثِّل فشلاً في عرض الأساس المنطقي للتهجين، ثم إن انجراف مندل للإدارة يمكن أن يكون مؤشراً أيضاً على خيبة أمله الشخصيَّة من النتيجة الهزيلة التي حصل عليها من عمله طوال حياته. وفي وقت لاحق اكتشف ثلاثة من علماء النبات هم، هوغو دوفريس Hugo de Vries في هولندا، وكارل إيرك كورنس Carl Erich Correns في ألمانيا، وإيرك تشرماك فون سيسنيغ Erich Tshermak von Seysenigg في

النمسا، بأنهم كانوا، من حيث لا يدرون، يكررون عمله على حد زعمهم. هناك نفحة غريبة من الاحتيال في هذه التقارير، حيث يُشار إلى أن واحداً من المؤلِّفين (دوفريس) قد أخَّر إقراره بأولويَّة عمل مندل إلى أن اتضح أن أحد الباقين (كورنس) قام بنشر عمل مماثل، وهذا دفع دوفريس إلى الإعلان عن أولوية عمل مندل في محاولة منه لتلطيخ سمعة ادعاءات كورنس، بعد أن أدرك أن عليه التنازل عن الأولويَّة بأيَّة حال. وقد قدّمت جميع أنواع التبريرات لإهمال مندل مدة خمسة وثلاثين عاماً، بما في ذلك أنه كان هاوياً متطفلاً على علم النبات، وأنه كان وثيق الصلة بكنيسة لا ينتج منها أيُّ شيء جيد، وأن استعماله للرياضيات ـ حتّى الحساب البسيط الذي استخدمه ـ كان مبهماً لعلماء الأحياء في ذلك الوقت. والحقيقة قد تكون أبسط من ذلك: فحتّى دوفريس وكورنس وفون سيسنيغ أعادوا إحياء عمله ونظروا إليه بعيون حديثة، دون أن يعتقد أيٌّ منهم أن هذه الأعمال ترتبط ارتباطاً وثيقاً بآلية الوراثة.

ومع أن مندل قام بأعماله في القرن التاسع عشر، إلَّا أن أهميَّة هذه الأعمال لم تتّضح إلَّا في القرن العشرين. فمثلما قام بلانك بتكميم الطاقة (انظر الفصل 7)، صرنا ندرك الآن أن مندل قام بتكميم الوراثة. ويمكننا أن نلاحظ الآن أن إنجازه كان توفير الدليل الذي أدَّى إلى انهيار نظرية التوارث التمازجي التي كانت سائدة آنذاك، والاستعاضة عنها في الوقت المناسب بنظريةٍ تذهب إلى أن المعلومات الوراثية تُنقل في وحدات منفردة. وطوال ثماني سنوات، صبّ مندل كامل اهتمامه وانتباهه على نبتة البازلاء *(Psium sativum)* التي تملك عدداً من السمات الخاصَّة تجعلها مثالية للدراسات التي يقوم بها. إحدى هذه السمات هي أن بنية الزهرة نفسها خاصة نوعاً ما، وهذا يجعل من السهل نسبياً تهجين نبتتَيْن أو تركهما تتلاقحان ذاتياً، كما يحدث في الطبيعة. وإضافة إلى ذلك، تُظهر نبتة البازلاء عدداً من الخصائص المتنوّعة: فبتلاتها أو أوراقها التويجيَّة مثلاً يمكن أن تكون بيضاء أو أرجوانيَّة، وحبوبها مستديرة أو متجعِّدة، والجزء الداخلي منها أخضر أو أصفر، وتنمو في قرون خضراء أو صفراء، وشكل النبتة يكون قصيراً وثخيناً أو ليفيًّا معرَّقاً. وأكثر من ذلك، وربما كانت الأسباب

الحقيقية، هي أنها كانت متوفِّرة بأسعار زهيدة عند باعة البذور، ولا تحتاج إلى حيِّز كبير، وتنتج عدداً كبيراً من الذراري (النسل) في وقت قصير نسبياً. وقد نتوهّم أيضاً أن حساء البازلاء كان يظهر بوتيرة مملَّة في قائمة طعام دير سان توماس. والعقبة الوحيدة في البازلاء أن منظرها في الحدائق لم يكن جذَّاباً بوجه خاص، لذا كان مندل يزرع في الحديقة التي يجري فيها تجاربه أزهار البغونيا الجميلة إرضاء للزوّار (انظر الشكل 2-1).



الشكل 2-1. حديقة مندل في الدير الذي كان يعيش فيه. كانت بحوث مندل تُجْرى على البازلاء الشائعة التي تبيَّن أنها خيار جيد، لأسباب اقتصادية إلى حدّ ما، ولكن أيضاً لأن كثيراً من خصائص البازلاء مستقلة من الناحية الوراثية. واليوم تمتلىء حديقة الدير بأزهار البغونيا الجميلة.

صُعق مندل بالطريقة التي يُنتج بها تهجينُ نباتات الزينة أنواعاً مختلفة تعاود ظهورها في الأجيال التالية. فقرَّر البحث عن الأسلوب المنهجي الذي اعتقد أنه موجود لكنه مستتر في الملاحظة. وخلال السنتين الأُولَيَيْن شرع في التوثّق من أن النباتات التي يعمل عليها تستولد بشكل مطابق، بحيث تُنتج نبتاتُ البازلاء الخضراء حبوباً خضراء ونبتات البازلاء الصفراء حبوباً صفراء، وهلمّ جرّا فيما

يتعلق ببقيَّة الخصائص. بعد ذلك بدأ سلسلة من التهجين الذاتي والمختلط. وعلى سبيل المثال، عندما قام بتهجين البازلاء الخضراء مع البازلاء الصفراء، كانت جميع حبوب بازلاء الجيل البنوي الأول (تعرف باسم الهُجُن F1) صفراء. لكن عندما تمّ تهجين هذه الحبوب بعضها مع بعض، كان ثلاثة أرباع حبوب بازلاء الجيل الثاني F2 صفراء وربعها خضراء. وبشكل غامض ومثير للدهشة، فقد عادت حبوب البازلاء الخضراء الأصلية للظهور. وقد ظهر نمط مماثل، والنسب العدديَّة ذاتها، عندما قام مندل بالتهجين ثم التلقيح الذاتي للنباتات مظهراً خصائص أخرى. وكان من الواضح أن ثمة نمطاً كان آخذاً في البروز، وأن ثمة أنماطاً تستوجب إيضاحاً وتفسيراً.

بنى مندل فرضيَّةً على أساس العدد الضخم من النتائج التي حصل عليها. وكان دليله الأول حقيقة أن تجاربه قادت إلى متغيِّرات بنسب عددية بسيطة. ولتفسير الأعداد المنفردة التي حصل عليها لهذه النسب، افترض أن الاختلاف بين كلّ خاصية (بازلاء خضراء وصفراء مثلاً) كان ناجماً عن وجود وحدات منفردة مختلفة في النبات. وقد استخدم مندل مصطلح «عنصر» ليدلّ على الكيانات المنفردة القابلة للتوريث، وكان يلجأ إلى «الصفات» المختلفة عند مناقشة المظهر الخارجي، أي النمط الظاهري phenotype، لنباتاته. وكانت معظم استدلالاته وحججه مرتكزة على هذه السمات القابلة للملاحظة، ولم يجر الانتباه بوجه مباشر إلى دور هذه «العناصر» الكامنة إلَّا بعد أن قام المفسِّرون بتوجيه الأنظار إليها في وقت لاحق. ومنذ ذلك الوقت أخذت هذه الكيانات أسماء مختلفة، لكنها تُعرف اليوم عالمياً باسم الجينات أو المورِّثات، وهو مصطلح اقترحه عام 1909 عالم البيولوجيا الدانمركي ويلهلم لودفيك يوهانسن Wilhelm Ludvig Johansen. وبدقَّة أعلى، تُسمّى الطُرزُ المختلفة للجينات المسؤولة عن نمط ظاهري معيَّن، كتلك المسؤولة مثلاً عن لون حبَّة البازلاء، الأليِّلات alleles. وهكذا، تتوافق البازلاء الخضراء والبازلاء الصفراء مع أليلات مختلفة للجين المسؤول عن لون البازلاء.

ولتفسير النسب العددية البسيطة التي حدَّدها مندل، نفترض أن الجينات ـ مستخدمين المصطلح الحديث ـ توجد في أزواج، بحيث يقابل الزوج الواحد صفة

واحدة، وبحيث تحتوي كلٌّ عروس gamete (أي البيوض والنطاف في الحيوانات، والبُذيرات واللقاح في النباتات) على أحد الجينات. وعندما يحدث الإخصاب (التأبير أو التلقيح في النباتات)، يندمج العروسان، الذكري والأنثوي، عشوائياً، ومن ثمّ يُعاد جمع الجينات الفرديَّة في أزواج. وقد عرّف مندل الصفات القابلة للتوريث بأنها صفاتٌ سائدة dominant أو متنحِّية recessive، ويمكننا بإدراك مؤخَّر أن نتبيّن أن هذا التمييز ينطبق أيضاً على الجينات. لذلك إذا اقترن أَلِّيل سائد مع أَلِّيلٍ مُتَنحٍّ، فإن النمط الظاهري سيُبيِّن صفات الألّيل السائد. وعلى سبيل المثال، أظهرت تجارب مندل أن أَلِّيلَ البازلاء الصفراء سائد على أَلِّيل البازلاء الخضراء، لأنه عندما يجري تهجين نبتات البازلاء الصفراء مع نبتات البازلاء الخضراء، فإن النسل كله يكون أصفرَ.

ونحن نستطيع توضيح هذه الأفكار باستخدام الرموز. دعونا نرمز إلى أَلِّيل البازلاء الصفراء بالرمز Y وألِّيل البازلاء الخضراء بالرمز y (وهذا هو الاصطلاح المتَّبع في أساسيات علم الوراثة: إذ يُشير الحرف الذي يدل على السمة المميزة trait إلى الأليل السائد بينما يُشير الحرف الصغير المقابل إلى الصنو المتنحّي). لذلك يُرمز إلى نباتات البازلاء المستولدة صفراء وإلى تلك المستولدة خضراء بالرمزين YY وyy على التوالي. أما أعراس كل نبات فيرمز إليها بـ Y وy على التوالي. وعندما يجري تهجين هذين النوعين فإن الذريَّة ينبغي أن تكون Yy، ويكون لون جميع حبّات البازلاء أصفر، لأن اللون الأصفر (Y) هو السائد. نقوم الآن بالتهجين الذاتي لهذه الأنواع. وبما أن أعراس النباتات Yy هي Y أو y كيفما اتَّفق، فإن ذرية النباتات Yy ستكون YY و Yy وyY، و yy. النبتة الأخيرة yy فقط ستكون موافقة للبازلاء الخضراء (لأن Y سائدة في yY وYy)، ولذلك تكون نسبة النباتات الصفراء إلى الخضراء 1:3، تماماً كما لاحظ مندل. كان مندل قادراً على توسيع هذا المخطَّط البسيط ليشمل سمات وتوليفات أخرى (على سبيل المثال، بازلاء خضراء ذات بنية قزمية)، وكان يجد في كلِّ حالة أن النسب المتوقَّعة كانت مؤكَّدة. (هنا كان الموقع الذي حدّد فيشر فيه حملته الإحصائية، لأن النسب كانت غير دقيقة، ولأن التشتّت من النتائج ـ الذي قد ينشأ نتيجة

الانحياز، أي التفكير بوحي الأماني، في تقرير ما إذا كانت حبَّة البازلاء ذات السطح القليل التجعيد قليلاً ملساء أو مجعَّدة، مثلاً ـ كان مثيراً للريبة).

ليست كل الوراثة مندليَّة بمعنى أنها تمتثل لقوانين مندل وتفضي إلى إحصائيّات بسيطة. ولعل أسوأ نصيحة في تاريخ المشورة الخبيرة هي التي أشار بها عالم النبات الألماني كارل ويلهلم فون نايغلي Carl Wilhelm von Nägeli، من جامعة ميونيخ، الذي لم يستوعب حجج مندل واقترح عليه أن يحوّل انتباهه عن البازلاء ويدرس بدلاً منها عشبة الصقر (حشيشة الغُراب Hieracium). غير أن عشبة الصقر تتكاثر بأسلوب التكاثر العذري parthogenesis (أي اللاجنسي) ولا تصلح كثيراً لإثبات نظرية الوراثة المندليَّة. ولا بدّ أن يكون مندل قد شعر نوعاً ما بالكآبة عندما لم تصل تجاربه على هذه العشبة إلى أيِّ نتيجة ولم تفلح بالتأكيد في تأييد أفكاره. وكان محبطاً أيضاً بسبب النتائج التي حصل عليها من نبتة الفاصولياء *(phaseolus)*، حيث يسهم عدد كبير من الجينات في الصفات التي كان يجري تقييماً لها والتي كانت تحجبها النسب البسيطة التي كان يتوقعها، وهي نسب واضحة جداً في البازلاء.

وهناك كثير من الحجج الدقيقة التي ترى أنْ الوراثة الجنسية ليست بمجملها وراثةً مندليةً، بسبب ارتباط بعض الجينات بجينات أخرى، ولأن وراثة بعض أزواج الصفات لا تتمّ عشوائياً. فضلاً عن ذلك، فالكثير من الجينات متعدد الانتماء pleiotropic، بمعنى أنها تتحكَّم بأكثر من سمة من سمات النمط الظاهري، والكائن العضوي ليس تطبيقاً فرديًّا one-to-one بين السمات والجينات. فعلى سبيل المثال، تؤدي إحدى الطفرات في ذبابة الفاكهة *Drosophila*، الشخصية الرئيسية في كثير من الدراسات الوراثية، إلى انعدام التخضّب في عيونها المركَّبة وفي كُليتَيْها (نُبيبات مالبيغي)؛ وفي طفرة أخرى، لا يُغيَّب الجناحان فقط من الجانبَيْن، وإنما تفقد الذبابة بعض الشعر من على ظهرها. وحتّى إحصائيات الوراثة المندلية البسيطة يمكن حجبها نتيجة تأثيرات ثانوية. وعلى سبيل المثال، تحمل القطَّة المانيَّة (من جزيرة مان) جيناً، دعونا نسمِّيه t، يتداخل مع التطور الطبيعي للعمود الفقري في قطط Tt وينتج منه

النمط الظاهري المألوف للقطط العديمة الذيل، علماً أن النسبة المضاعفة من الألِّيل، التي تعطي قطة من نوع tt، ليست قابلة للحياة وأن أجنّة النوع tt تموت. ونتيجة لذلك فإن التهجين الذاتي للقطط Tt يعطي قططاً من نوع TT وTt وtT بنسبة 2:1 في الذرية التي تصل إلى مرحلة الولادة، بدلاً من النسبة المتوقَّعة 3:1[2].

●

عند هذه النقطة توقّف البحث في الموضوع مدة خمس وثلاثين سنة، إلى أن عاد للظهور وأُقِرّ به، وإن بتردُّد، بظلِّ الظروف الضبابية نوعاً ما التي أشرنا إليها من قبل. ولكن فيما كانت ملاحظات مندل تغطّ في سُبات، كان علم الأحياء يسلك اتجاهاً آخر كان مقدَّراً له أن يندمج به.

إن عالم الأحياء الألماني أرنست هايْكل (1834–1919) Ernest Haeckel الجدير أن نستشهد به، ابتدع لنا مصطلح علم تطوّر السلالات phylogeny، ومعناه التاريخ التطوّري للنوع، واقترح أن "علم تطوّر الكائنات" ontogeny يُلخِّص بإيجاز "علم تطوّر السلالات". وكان يقصد بذلك أن التغيرات التي يتعرض لها الجنين أثناء نموّه داخل الرحم إنّما هي صورة سريعة لتطوّر النوع. كما اقترح أيضاً أن السياسة هي بيولوجيا تطبيقية، وكان لذلك تداعيات خطيرة بعد عشرين سنة على وفاته. وعلى نحو أكثر صلة بموضوع النقاش الجاري، اقترح في العام 1868 أن نُوى الخلايا البيولوجية تحتوي على معلومات تتحكَّم بعملية الوراثة. وقد طوّر عالم الأجنَّة الألماني وولتر فليمنغ Walther Fleming هذا الاقتراح عندما اكتشف عام 1882 أن نوى خلايا يرقات السمندل تحتوي على بُنى دقيقة شبيهة بالعصيّات rod-like يمكن أن تتلوَّن بامتصاص بعض الصباغ. وبناء على هذا الاكتشاف، اقترح ويلهلم فون والداير Wilhelm von Waldeyer عام 1889 اسم الكروموزوم أو الصبغيّ Chromosome (الجسم الملوَّن)[3].

(2) إن امتلاك قطط مانكس لعيون ذات ألوان مختلفة لا علاقة له بانعدام وجود ذيل لهذا النوع من القطط.
(3) كان والداير بارعاً في تسمية الأشياء، وهو الذي سمَّى أيضاً «النورون» عام 1891.

ومن الصعب للغاية حساب أعداد الكروموزومات في نوى الخلايا، لأنها تكون محلولة ومتشابكة وموزّعة في أرجاء النواة إلى أن تبدأ عملية الانقسام، وعندئذ تبدأ بالتضاعف والانقسام. ويحتوي ما نعتبره حيوانات دنيا ونباتات ضمناً على عدد من الكروموزومات أقلّ مما لدينا: إذ إن لدينا 23 زوجاً من الصبغيات، بينما لدى فأر المنازل عشرون فقط. ومع ذلك فللطماطم 22 زوجاً، وللبطاطس، وهذا محيِّر، 24 زوجاً. وفي الحقيقة، فقد كان من الصعب أن يتقبَّل الإنسان أن عدد الكروموزومات الذي اعتقد طويلاً أنه يملكه يماثل العدد الذي يملكه الشمبانزي (أربعة وعشرون زوجاً)؛ ولم يمكنه أن يتقبَّل العدد الصحيح، أي ثلاثة وعشرين، إلَّا بعد أن كظم كبرياءه وأثبت بالحجج أن عدد الكروموزومات لا علاقة له بالتشبُّث بالرأي والإعجاب بالذات.

ومع انعطافة القرن انتاب علماءَ الأحياء الشكُّ حيال ما إذا كانت الكرموزومات هي بالفعل أدوات الوراثة. وفي عام 1902، خطت تلك الكروموزومات أولى خطواتها مع الوراثة المندلية عندما قام والتر ساتون (1877–1916) Walter Sutton، وهو طالب متخرِّج يعمل في جامعة كولومبيا بنيويورك، بدراسة نطاف الجنادب (وبالتحديد النوع *Brachystola magna* الذي ينتشر في كافة السهول الغربية للولايات المتحدة والمكسيك، بخلاياه الكبيرة وكروموزوماته التي يمكن رؤيتها بوجهٍ معقول)، ووجد أن كروموزوماتها التي تكون بشكل أزواج تنفصل بالفعل بحيث يتجه أحد فردي كلِّ زوج إلى خليَّة مختلفة. وقد أُطلق على اكتشاف ساتون اسم نظرية ساتون ـ بوفيري؛ لأن تيودور بوفيري (1862–1915) Theodor Boveri، وهو عالم أحياء ألماني كان يدرس بيوض قنافذ البحر، ادعى في عام 1904 أنه كان يملك الفكرة نفسها في الوقت نفسه تقريباً مع ساتون. ومع أن بوفيري أسهم في الواقع (مع آخرين) في بعض الأفكار الرئيسية، إلَّا أنه كان يحظى ـ وهذا أكثر أهمية ـ بأصدقاء من ذوي النفوذ.

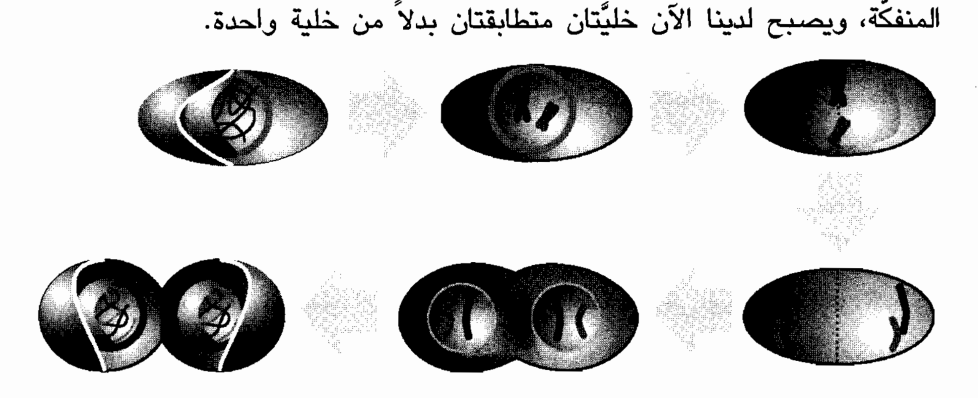
في هذه المرحلة يمكننا أن نستنتج أن جينات مندل كانت محمولة على كروموزومات ساتون. وكان العالم مستعداً لقبول علم جديد، ففي عام 1905 اقترح ويليام باتيسون William Bateson مصطلح «علم الوراثة" genetics" في

رسالة إلى آدام سيدجويك Adam Sedgwick، عالِم الحيوان في جامعة كمبردج، ومن ثمّ عَلَناً عام 1906 في المؤتمر الدولي حول التهجين. إن عدم رشاقة أسلوبه، وربّما المدى الذي بلغه إيصال العلم إلى الجمهور في مئة سنة، يمكن الحكم عليهما من ملاحظته أن المصطلح (علم الوراثة) يشير بما يكفي إلى أن أعمالنا مكرَّسة لتوضيح ظاهرة الوراثة والتغيُّر: وبمعنى آخر، لفيزيولوجيا السلالات، مع ما لها من تأثير ضمني على النظرية لعالِم التطور وعالِم التصنيف، ومن تطبيقات على المسائل العملية لمستولدي الكائنات، سواء كانت حيوانات أم نباتات.

وقبل أن نتقدم خطوة أخرى في علم الوراثة وعالمها السفلي، علينا أن ندرك الأشياء التي تنطوي عليها عمليتان شديدتا الأهمية هما الانقسام الفتيلي أو الخيطي mitosis، أي انقسام الخلايا الجسمية (خلايا الجسم العادية)، والانقسام المنصِّف meiosis، أي تكوين الأعراس (النطاف والبيوض واللقاح والبُنَيْرات) في مَناسل (الأعضاء الجنسية) الحيوانات وفي مآبر ومبايض النباتات. ويعد تعقيد العملية الأخيرة أحد الأسباب التي تجعل تطور التكاثر الجنسي مسألة صعبة جداً على الفهم، والتي تفسر ضرورة أن يكون هناك مثل هذا الكمّ الهائل من المكافآت التطوّرية (الفصل 1). ومع ذلك، فقد ارتفعت الطبيعة إلى مستوى المهمَّة الملقاة على عاتقها، وأصبح الانقسام المنصِّف - وهو عملية أكثر تطلُّباً من الناحية اللوجستيَّة من الانقسام الفتيلي - يحدث متى وحيثما تدعو الحاجة. إن هذا الكتاب ليس كتاباً تعليمياً في البيولوجيا، لذلك سوف أزوّدكم فقط بالخطوط العريضة للعمليتين بالقدر الذي نحتاج إليه لفهمهما وفهم ما سيلي في هذا الفصل.

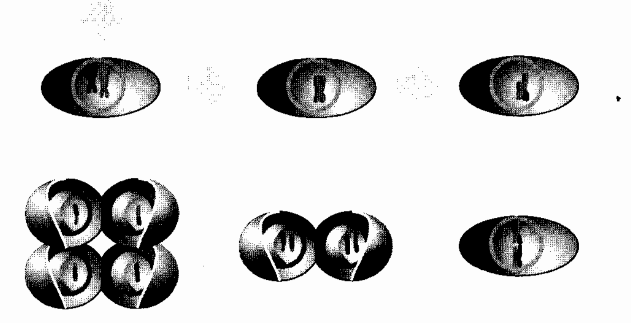
أولاً، لنتكلَّم عن الانقسام الفتيلي (الخيطي) أو تنسُّخ الخلايا الجسمية. فالخليَّة لها، كما هو معروف، عمر دوريّ، وهي تمضي أقل من عشرة بالمئة تقريباً من عمرها في الانقسام الفتيلي. ومع ذلك فالوقت المتبقي هام جداً، لأنه يجري خلاله تحضير كثير من المادّة التي تستعمل في عملية التنسُّخ. وخلال معظم هذا الوقت، الذي يتّسم بعدم النشاط ظاهرياً ولكنه خصب بالفعل، تتمدّد صبغيَّاتنا (كروموزوماتنا) المتجمّعة في ثلاثة وعشرين زوجاً وتتوزّع بطريقة

معقَّدة في كل أنحاء نواة الخلية. وعند بدء الانقسام الفتيلي (الشكل 2-2)، تتقلّص الصبغيات بالالتفاف على نفسها، استعداداً للتحرُّك برشاقة أكثر في جميع الاتجاهات. وفي هذه المرحلة، يصبح من الواضح أيضاً أن كلَّ صبغيٍّ قد خضع لعملية تنسُّخ، لأن كلاً منها أصبح مؤلَّفاً من وحدتَيْن متماثلتَيْن تشبهان العصا تُسمَّى الواحدة منهما شقًّا صبغيًّا أو صبغيداً chromatid، وتتصلان معاً في منطقة تُسمّى القُسَيْم المركزي centromere لتشكلان ما يشبه حرف X بعد مطه. بعد ذلك يتحلّل الغلاف النووي وتندمج معاً المكوّنات النووية والسيتوبلازما cytoplasm المحيطة بها، أي المزيج المعقَّد من المركبات والبنى الموجودة بين الجدار الخلوي والنواة. ينفصل الآن الشقّان الصبغيان أحدهما عن الآخر، ويبدأ غشاء خلوي جديد بالتشكّل بين مجموعتي الصبغيّات (الشقوق الصبغية)، ويبدأ غشاء نووي جديد بالتشكُّل حول كلٍّ وحدة منتسخة، أي حول الصبغيات المنفكّة، ويصبح لدينا الآن خليَّتان متطابقتان بدلاً من خلية واحدة.



الشكل 2-2. عملية الانقسام الفتيلي، أو انقسام خلية جسدية إلى نسختين متطابقتين. في البداية تكون الصبغيات منتشرة في كامل النواة (الممثّلة هنا بالكرة الداخلية). وعندما يبدأ الانقسام الخلوي، تلتفّ الصبغيات على بعضها وتتناسخ، وتشكّل أجساماً تشبه حرف X الممطوط (نشاهد هنا صبغيّين فقط؛ علماً أن خلية الإنسان تحتوي على ثلاثة وعشرين زوجاً صبغياً) يتألّف كل منها من شقَّيْن صبغيين متصلين عند القُسَيْم المركزي. تنتظم الصبغيات في المستوى المركزي، ويتحلّل الغشاء النووي، وينفصل الشّقان الصبغيان، ويبتعدان أحدهما عن الآخر داخل سيتوبلازما الخلية. وعندما يحصل ذلك، يتشكّل الغشاء النووي من جديد ويبدأ غشاء الخلية بالانغلاق حول كلٍّ نواة. أخيراً، تنحلّ لفّات الصبغيات ونحصل على خليَّتين مضاعفتين diploid متطابقتين (أي خليتين تتجمَّع الصبغيات فيهما في أزواج)، بدلاً من خلية واحدة كانت لدينا في الأصل.

لننظر الآن في الانقسام المنصِّف meiosis، أي عملية تشكُّل الأعراس. وهذه العملية أكثر دقّة من الانقسام الفتيلي، لأن حصيلتها النهائية هي بالضرورة تشكّل أربع خلايا، تحتوي كلٌّ منها على نصف المجموعة الكاملة للصبغيات (ثلاثة وعشرون صبغياً عند الإنسان). وهذه العملية معقَّدة قليلاً، لذلك يستحسن أن نتَّبع الخطوات في الشكل 2-3، حيث ركّزنا على زوج واحد من الصبغيات. في البداية، تكون الصبغيات متشابكة معاً، وتملأ النواة، لكن عندما يبدأ الانقسام المنصِّف، تتحرَّر من تشابكها وتنكمش. وفي هذه المرحلة يبدو واضحاً من خلال الميكروسكوب أن كلَّ صبغي قد انتسخ وصار مكوناً من شقَّين صبغيّين متصلين عند أحد القُسَيْمات المركزية لتشكيل الحرف X العادي الممطوط، تماماً كما يحصل في الانقسام الفتيلي.



الشكل 2-3. عملية الانقسام المنصِّف، أي تشّكل الأعراس. تهدف استراتيجية الانقسام المنصِّف إلى تحويل خلية مضاعفة إلى أربع خلايا مفردة haploid (خلايا تحتوي على صيغة مفردة للكروموزوم) وإلى مزج التركيب الوراثي للصبغيّات الأم. مرَّة ثانية، سنعرض فقط زوجاً واحداً من الصبغيات في الخليَّة الأم. في البداية، يكون الصبغيان منتشرين في كامل النواة. إلا أنه عندما يبدأ الانتصاف، يلتفّ الصبغيان ويتضاعفان لإعطاء زوجَيْن من الشقوق الصبغية المقترنة، تماماً كما يحدث في الانقسام الفتيلي. غير أن الأزواج المتقابلة للشقوق الصبغية المزدوجة تنتقل سويَّة وتتبادل المادة الوراثية وهي ممدَّدة بجانب بعضها البعض، ثم تنتقل إلى المستوى المركزي حيث يحدث أول انقسام فتيلي (لا تظهر تفاصيله هنا) يؤدي إلى تشكّل خليتَيْن تحتوي كلٌّ منهما على صبغيّين. يلي ذلك انقسام فتيلي ثان ينفصل فيه مرَّة ثانية الصبغيّان الموجودان في كلٍّ نواة. وفي النهاية، نحصل على أربع خلايا مفردة، تحتوي كلٌّ منها على صبغي هو مزيج جيني من الصبغيّين الموجودين في الخليَّة الأم. التوالد إذن- افتراضياً وليس آلياً - هو انعكاس للانقسام المنصِّف، يتّحد فيه الصبغيّ المفرد في العروس التي يعطيها أحد الوالدَيْن بالصبغي المفرد الذي يعطيه الوالد الآخر.

ومع ذلك، يتحرَّك الآن زوج الصبغيد الوارد من الأب مع زوج الصبغيد الوارد من الأم ويشكِّلان وحدة متطاولة تشبه جانبي السحَّاب. ويكون كل صبغي متصلاً بالغلاف النووي عند أطرافه، التي تُسمّى القُسَيْمات الطَّرَفيَّة (أي "الأجزاء البعيدة")؛ ومن المحتمل أن تُساعد وسيلة التثبيت هذه أحد جانبي السَّحَّاب على إيجاد قرينه الآخر. وفي الوقت الذي يكون فيه الصبغيَّان ممدَّدين معاً، يحصل تبادل (تعابر) بين المادّة الموجودة في الصبغيد الممثِّل لما أعطاه الأب مع المادّة الموجودة في المنطقة المناظرة للصبغيد الذي أعطته الأم. وهذه هي اللحظة التي يحدث فيها التغاير الجيني في العضويَّة.

بعد عملية التعابر crossing-over هذه، التي تشكّل منعطفاً حاسماً في تاريخ العضويَّة، ينسحب زوجا الصبغيدين المختلطَيْن إلى منطقتين مختلفتين، كما يحدث في الانقسام الخيطي، لتكوين خليَّتين تحتوي كلٌّ منهما على زوج من الصبغيدات. وهذا هو «الانقسام الخيطي الأول» في الرسم التوضيحي. بعد ذلك، وخلال «انقسام خيطي ثان»، ينسحب كلٌّ من أزواج الصبغيدات متحوّلاً إلى صبغيّات إفرادية، تشغل الآن خلايا إفرادية. عند هذه النقطة الأخيرة من العملية، يصبح لدينا أربع خلايا بدلاً من خلية واحدة كانت لدينا سابقاً، وتكون المادَّة الجينية الأصلية من كلا الأبوَيْن قد توزعت على الخلايا الأربع كلها. وقد تحتوي صبغيات خلية من هذه الخلايا على الألِّيل Y السائد للجين الخاصّ بالبازلاء الصفراء؛ وقد تحتوي صبغيات أخرى على الألِّيل y المتنحِّي للجين الخاصّ بالبازلاء الخضراء. ويكون حساب مندل قد أوشك على الظهور في حديقته. ومع ذلك تجدر الملاحظة إلى وجود وجه آخر للعلم: ثمة قدر عالٍ من التعقيد - يتجلّى في هذه الحالة في بيولوجيا الخلايا- يمكن أن يكمن تحت ملاحظة حسابية بسيطة.

●

لقد حان الوقت الآن لطرح السؤالين التاليين عن الكروموزوم (الصبغي). أولهما، ما هي المادة الفعلية للوراثة؟ وثانيهما، ما هو المجُسِّد المادي للمعلومات الوراثية؟

لقد نشأت الفكرة التي تقول إن مادة كيميائية ترمِّز المعلومات الوراثية خلال القرن التاسع عشر، إذ، في النهاية، لا يمكن أن يكون شيء غير ذلك. وما إن تمّ القبول، بدءاً من قرابة عام 1902 فصاعداً، بأن البروتينات هي جزيئات خيطيَّة طويلة (تكون ملتفَّة عادة على شكل كُرَيَّة) مبنيَّة في نسق محدَّد من مجموعة من نحو عشرين حمضاً أمينيًّا (سنذكر المزيد عنه لاحقاً)، حتى ساد تحمُّس عام للفكرة التي تقول إن البروتينات تعمل على ترميز المعلومات الوراثية، بحيث أن الرسائل المنقولة من جيل إلى جيل تختلف باختلاف سلاسل الحموض الأمينية. وعلى نحو لا يمكن إنكاره، كان هناك حضور مُحيِّر في نوى خلايا نوع آخر من الجزيء، سمّي «بالحمض النووي» اعترافاً بمنشئه النووي، كان مكوَّناً من خيط من نوع آخر من الوحدات التي سنأتي على ذكرها لاحقاً. وكان يُنظر إلى هذه الحموض النووية بأنها مضجرة وبأنها من الناحية البنيوية بسيطة جداً لتكون قادرة على إرسال هذا الكمّ الهائل من المعلومات التي تحملها الصبغيات. وقد افتُرِضَ على نطاق واسع أن الدور الذي تؤديه محصور في بنية الخلايا، كما هي الحال في سيلولوز النبات.

تلك النظرة تغيرت في عام 1944. فقد كان عازف البوق وعالم الكيمياء الحيوية أوزوالد أفيري Oswald Avery (1877–1955)، المولود من مهاجرَيْن بريطانيين في مقاطعة نوفاسكوتيا الكندية، والذي أمضى كامل حياته المهنية في الولايات المتحدة، يجري دراسات على أنواع مختلفة من جرثومة المكوَّرة الرئوية pneumococcus الموجودة في أفواه المرضى المصابين بذات الرئة وفي الأشخاص الأصحَّاء. وكان معروفاً منذ العام 1923 أن جراثيم المكوّرات الرئوية (البكتيريا التي تسبِّب التهاب الرئة) تكون في أشكال متنوعة: أشكال غير مفوَّعة أو لا فيروسية تبدو خشنة للعين، وسلالات مفوَّعة (فيروسية) تبدو ملساء. وقد بيَّن فريدريك غريفّيث Frederick Griffith (1879 –1941)، الذي كان يعمل على العِقديَّات الرئويَّة Streptococcus pneumoniae في وزارة الصحة بلندن، أن السلالات الخشنة والملساء يمكن أن تتحوّل إحداها إلى الأخرى. وفي عام 1930 انكبَّ أفيري وزملاؤه على العمل واكتشفوا بسرعة أن التحوُّل من نوع جرثومي

إلى آخر يمكن أن يتحقَّق بواسطة خُلاصات من الخلايا، وأن التوصّل إلى «أصل التحويل» هذا، الذي بدا أنه العامل الفعَّال، أمر ممكن. بعد ذلك ركَّز أفيري على تحديد طبيعة أصل التحويل، ووجد أن البروتيازات، وهي أنزيمات تُخمِّد البروتينات، ليس لها أي تأثير في نشاط «أصل التحويل»، وهذا يعني أنه ليس بروتيناً. ووجد أيضاً أن الليبازات، وهي أنزيمات تتلف الليبيدات، أي المواد الدهنية التي تكوِّن جُدُر الخلايا، ليس لها أي تأثير في «أصل التحويل»، وهذا يدلّ أيضاً أنه ليس ليبيداً. وبعد أن حسم مسألة تحديد طبيعة «أصل التحويل»، استمرّ بإجراء سلسلة من التجارب بيَّنت على وجه حاسم أن «أصل التحويل» كان مجرَّد حمض نووي قديم. فقُلبت المفاهيم رأساً على عقب، وتعزّز شأن الحموض النووية ولمع اسمها كما لمع اسم كلارك كنت في دور سوبرمان، لتصبح الجزيئات التي تحظى بأكبر قدر من الإثارة والاهتمام في العالم.

لم يكن الجميع مقتنعاً بذلك. فالبعض كان مولعاً بالنظرية البروتينية في الوراثة لدرجة أنه واصل ادعاءه بأن «أصل التحويل» ربما كان بروتيناً غير مكتشف مرتبطاً بالحمض النووي. لكن هذا الرأي رُفض بوجه قاطع في السنوات القليلة التالية. ففي عام 1952، قدّم ألفرد هرشي Alfred Hershey (1908–1997)، ومساعدته الطالبة غير المتخرجة مارثا تشيس Martha Chase، تقريراً بنتائج تجاربهما على العاثيات bacteriophages، وهي الفيروسات التي تصيب الجراثيم بالعدوى. وقد ورد في التقرير أن عنصر الفسفور يوجد في الحموض النووية ولا يوجد في البروتينات، وأن عنصر الكبريت يوجد في البروتينات ولا يوجد في الحموض النووية. من ثَمّ، ومن خلال اقتفاء مكان وجود كل عنصر باستخدام أنواع مشعَّة منهما، أظهرا، أنه خلال عملية العدوى (إصابة الجرثوم بالعاثية)، فإن الحمض النووي للعاثية هو وحده الذي يدخل إلى الخلية الجرثومية، وليس أيّ من بروتيناتها. وقد أقنعت هذه التجربة العالَم بأن الحمض النووي هو الذي يحمل شيفرة المعلومات الوراثية.

في غضون ذلك، حصل تطوُّر على صعيد بنية حمض نووي خاص هو الحمض الريبي النووي المنقوص الأكسجين المعروف بحمض "الدنا"

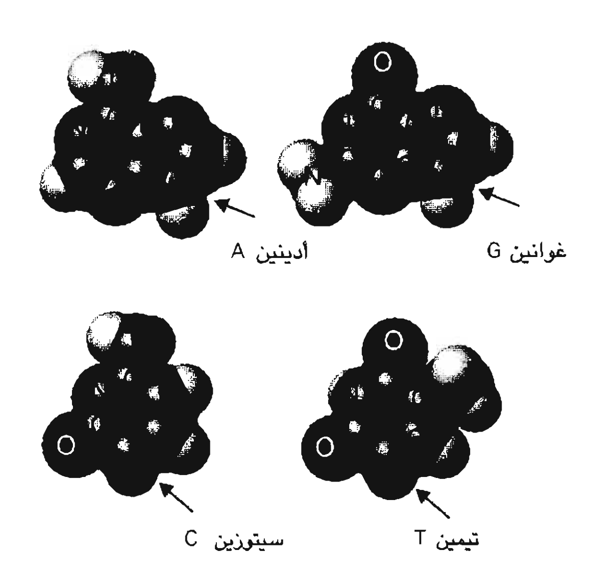
deoxyribonucleic acid (DNA). وقد تمّ التعرُّف إلى هذا المركَّب في عام 1868 من قبل الطبيب السويسري فريدرك ميشر داخل خلايا حصل عليها من الضمادات المشرّبة بالقيح لجنود جرحى في بلدة توبينغن الألمانية. والقيح هو عادة تراكم خلايا دم بيضاء تتجمَّع من أجل محاربة العدوى؛ ومع أن خلايا الدم الحمراء في الثدييات معدومة النوى، فإن خلايا الدم البيضاء تتميّز بوجود نوى، وبالتالي تعتبر مصدراً للحموض النوويَّة.

ولكي نفهم كلّ ما سيرد لاحقاً، فإننا بحاجة إلى معرفة قليلة عن التركيب الكيميائي للدنا. وأفضل طريقة لتحقيق ذلك تكون بتشريح اسمه الكامل، أي الحمض الريبي النووي المنقوص الأكسجين. يشبه جزيء هذا الحمض خيطاً طويلاً، توجد على امتداده وحدات ترتبط به بانتظام. والخيط نفسه مكوّن من جزيئات من السكر تتناوب مع مجموعات فسفاتية. أما جزيء السكر فهو الريبوز، الوثيق الصلة بالغلوكوز، بعد أن نزعت منه ذرة أكسجين واحدة (ولهذا فإن العبارتين «منقوص الأكسجين» و «الريبي» هما جزءان من اسمه). وكما يبيِّن الشكل 2–4 فإن الريبوز مؤلَّف من حلقة بسيطة من أربع ذرّات كربون وذرة أكسجين واحدة، إضافة إلى أشياء أخرى مرتبطة بالحلقة. وتتألف المجموعات الفسفاتية التي تربط بعضها ببعض حلقاتُ الريبوز المنقوص الأكسجين من ذرّة فسفور (تذكَّر تجربة هيرشي) مرتبطة بأربع ذرات أكسجين. إذن، العمود الفقري للدنا هو تماماً هذا التناوب بين مجموعات الفسفات ومجموعات الريبوز المنقوص الأكسجين التي تتكرَّر على هذا النسق مئات آلاف المرات مثل خيط طويل هشٍّ من اللآلىء.

هذا هو العمود الفقري. ويرتبط بكل حلقة ريبوز منقوص الأكسجين جزيء آخر يُسمَّى القاعدة النوكليوتيدية nucleotide base. ولكلمة «قاعدة» في هذا الاسم أصل تقني، لأن القاعدة في علم الكيمياء مركب يتفاعل مع الحمض: أما في هذه المركَّبات، فإن مصطلح «القاعدة» يشير إلى وجود ذرّات النتروجين في الجزيئات، وهي سمة عامَّة للقواعد في الكيمياء. يوجد في الدنا أربع قواعد نوكليوتيدية فقط، وهي تحديداً الأدينين (يُشار إليه عادة بالرمز A)، والغوانين (G)،

الشكل **4-2**. بنية الحمض الريبي النووي المنقوص الأكسجين (الدنا). يمكن أن نفهم بنية هذا الجزيء المعقَّد من خلال النظر إلى كيفية بنائه من مكوّنات بسيطة. في الأعلى إلى اليسار، نرى ريبوز السكر. يتألف هذا الجزيء من حلقة مكوّنة من أربع ذرّات كربون (C) وذرة أكسجين واحدة (O)، مع أشياء أخرى مرتبطة بها. الآن تخيَّل أن ذرّة أكسجين واحدة، كتلك الموجودة على ذرة الكربون في الجانب الجنوبي الشرقي للحلقة (السهم 1)، قد نُزعت لإعطاء ريبوز منقوص الأكسجين، وأن مجموعة فسفاتية قد ارتبطت بالطرف الآخر للجزيء. تصوَّر الآن أن مجموعة جزيئية ـ قاعدة نوكليوتيدية (انظر الشكل 2–5، لكنها ممثَّلة هنا بنقطة) قد ارتبطت بإحدى ذرات الكربون على الحلقة (السهم 2)، وأن مجموعة فسفاتية قد ارتبطت بذرة كربون أخرى على الحلقة (السهم 3) لإعطاء سلسلة طويلة، كما هو مبيَّن إلى اليمين. هذه السلسلة هي حمض الدنا.

والسيتوزين (C)، والتيمين (T). وتتشابه بنى جميع هذه الجزيئات تقريباً، وهي مبيَّنة في الشكل 2–5. وكما نتبيَّن من هذا الرسم التوضيحي، فإن القواعد الأربع تُصنَّف في زوجين اثنين. يتميَّز الأدينين والغوانين بالشكل نفسه تقريباً، حلقتان من ذرّات الكربون والنتروجين ملتصقتان معاً. وهذه البنية هي صفة مميِّزة لفئة من المركَّبات يطلق عليها الكيميائيون اسم «البورينات». في المقابل، يكون للسيتوزين والتيمين حلقة واحدة من ذرّات الكربون والنتروجين. وهذه البنية مميِّزة لمركَّبات تُدعى «البيريميدينات». ولكي تتخيل شكل جزيء الدنا، تصوَّر بأن إحدى هذه القواعد الأربع ترتبط بكل مجموعة ريبوز في العمود الفقري، وذلك باختيار عشوائي على ما يبدو للقاعدة عند كلِّ موقع. ربَّما بدأت تُدرك الآن لماذا كان الناس يعتقدون أن الدنا شيء يبعث على الضجر.



الشكل 2-5. القواعد الأربع التي تشكِّل حروف الكود (الراموز) الجيني. ينتمي الأدينين (A) والغوانين (G) إلى البورينات، بينما ينتمي السيتوزين (C) والتيمين (T) إلى البيريميدينات. (الذرّات الرمادية الفاتحة الصغيرة غير الموسومة هي ذرّات الهيدروجين). وتشير الأسهم إلى ذرّة النتروجين التي تشكِّل صلة الوصل مع وحدة الريبوز في الدنا.

ما إن تمّ تحديد الدنا بأنه المادة الوراثية حتى تركّز الاهتمام ببنيته التفصيليَّة. وكانت هذه البنية قد بدأت تنبعث من الضباب عندما قام عالم الكيمياء الحيوية النمساوي الأمريكي إروين شارغاف، الذي ولد في تشرنيفستي في غربي أوكرانيا (ضُمَّت فيما بعد إلى النمسا تحت اسم تشرنوفيتز) وهاجر إلى الولايات المتحدة للعمل في جامعة كولومبيا بنيويورك، بتوجيه اهتمامه إلى هذه المسألة. ففي عام 1950، وجد شارغاف، مستخدماً تقنية "الاستشراب الورقي الجديدة" التي تتيح فصل عيِّنات أنواعٍ وثيقة الصلة وتحديدها عن طريق غسل المزيج على طول شريط ورقي، مقادير متساوية من الأدينين والتيمين، ومقادير متساوية من الغوانين والسيتوزين، بصرف النظر عن النسيج الذي استخلص منه الدنا. وقد أوحى ذلك بأن الأدينين كان، لسبب من الأسباب، يترافق دائماً مع التيمين، وأن الغوانين يترافق دائماً مع السيتوزين. كما وجد أيضاً أن النسب بين كل زوج من القواعد تختلف باختلاف النوع، لكنها تبقى هي ذاتها في خلايا مختلفة من الحيوان (النوع) نفسه. وقد دلَّت هذه الملاحظة على وجود أكثر من نوع من

الدنا، وأن تركيب كل دنا هو محدَّد وخاصٌ للعضوية، تماماً كما يمكن أن تتوقّع من المخططات التفصيلية. وقد وجد شرغاف أيضاً أنه مهما كان نوع العيِّنة الذي يستخدمه مصدراً للدنا، فإن المقدار الإجمالي للبورينات (الأدينين والغوانين المزدوجي الحلقة) هو المقدار الإجمالي نفسه للبيريميدينات (السيتوزين والتيمين الأحاديي الحلقة). وقد اتَّضح أن جمع هذه المعلومات كان حاسماً تماماً في التعرُّف إلى بنية الدنا، وأن إدراكها المتأخّر كان كافياً تقريباً للتوصل إلى معرفة بنية الجزيء.

كانت المعلومات التي تكشَّفت عن دراسات انعراج الأشعة السينية والتي قام بها كلٌّ من النيوزيلندي موريس ويلكنز Mourice Wilkins (مواليد 1916) وروزاليند فرانكلين (1920–1958) في كينغز كولدج بلندن، ونشر نتائجها فرانسيس كريك (المولود عام 1916 في نورث هامبتون) وجيمس واطسون (المولود عام 1928 في شيكاغو) في جامعة كامبردج، بمثابة الريح التي هبَّت أخيراً لإبعاد الغشاوة المتبقية عن بنية الدنا. وكما تردَّد لآلاف المرات، فإننا أمام قصة عن النصب والاحتيال والتنافس، والاندفاع، والاجتهاد، والضغينة، والمأساة، وكره النساء، والخداع، وفوق كلِّ ذلك التخيُّل والقدرة على الإبداع. إنها قصة أحد أهم اكتشافات القرن العشرين التي استثارت معظم العواطف والمواقف الإنسانية، لعلها ليست مفاجئة على الإطلاق.

لا ريب في أن الشخصية المأسويَّة في القصّة هي فرانكلين التي توفِّيَت بسبب سرطان المبيض وهي في السابعة والثلاثين من العمر، نتيجة تعرُّضها شبه المؤكّد للأشعة السينية التي كانت تستخدمها في عملها[4]: فالحياة لا تتخلَّى بسهولة عن سرِّها دون أن تخطف حياةً أخرى ثمناً لذلك. ومع أن الأمر مُغْرٍ، فمن غير اللائق أن يرفع شأن فرانكلين من شخصية مأسويَّة إلى بطلة تراجيديَّة وأن يُعطى لها دور في صميم القصة، إذ يبدو أن الحقائق المتعلقة بهذه القصة

(4) انعراج الأشعة السينية تقنية تمرر فيها حزمة من الأشعة السينية عبر بلَّورة. تتبعثر الحزمة في اتجاهات مختلفة بواسطة صفوف منتظمة من الذرّات تعطي نمطاً من الشدّات المختلفة يمكن تفسيره بدلالة مواضع الذرات في البلورة.

الإنسانية هي كما تبدو في السطور التالية. وينبغي النظر إليها مدخلين في اعتبارنا ظروف بريطانيا في منتصف القرن العشرين، حيث كانت مواقف الرجال تجاه النساء، بعكس نظرة اليوم، ... غير متطوّرة.

كان ويلكنز يدرس حمض الدنا في كلية كينغز كولدج، عندما قام رئيس المختبر، الذي كان يسعى لبناء وحدة للأشعة السينية، بدعوة فرانكلين للانضمام إلى الكلية والإفادة من خبرتها في علم البلّورات بالأشعة السينية. وكانت فرانكلين قد اكتسبت خبرتها هذه من خلال بحوثها في البنية المجهرية للفحم الحجري في أحد مختبرات باريس، وكانت تتوق إلى تحويل اهتمامها إلى الكائنات الحيَّة بدلاً من الأحافير والمستحثَّات. ولم يكن من الواضح تماماً أنها ستنجح في تحقيق هذا التحوّل، لأن كلية كينغز كولدج كانت في ذلك الوقت تستثني النساء من الدخول إلى قاعتها العامة[5]. لم يكن ويلكنز حاضراً عندما وصلت فرانكلين، وبدا عند عودته مرتبكاً حيال دورها. وكان هناك تنافر واضح في الأمزجة، فقام كلٌّ منهما ببناء مختبره لدراسة الدنا. وسرعان ما حصل الفريقان على صور فوتوغرافية بالأشعة السينية جيدة نوعاً ما للألياف المكوَّنة من الجزيء. وفي اجتماع عقد في نابولي، التقى ويلكنز بعالم البيولوجيا الأمريكي الشاب جيمس واطسون، وعرض عليه صوره. وقد شجَّع ذلك واطسون على العمل على دراسة بنية الدنا، حيث انتقل في أيلول/سبتمبر 1951 إلى كامبردج ليتعلَّم مسألة انعراج الأشعة السينية في المختبر الذي كان يديره حينذاك السير لورانس براغ Laurence Bragg، أحد مؤسِّسي علم البلورات بالأشعة السينية X-ray crystallography. وهناك اجتمع بفرانسيس كريك، الذي كان ينهي دراسة الدكتوراه.

في تشرين الثاني/نوفمبر 1951، حصل اصطدام بين التيَّارَيْن الاجتهاديّيْن: تيار يدعو إلى القياسات الدقيقة وليس لديه الشجاعة (أو التلهُّف) على اقتراح

(5) لا ينبغي أن أضحك بسرِّي: حتّى في كلِّيتي لم يُسمح للنساء بدخول القاعة المشتركة حتى سبعينيات القرن العشرين.

التفسيرات، وآخر يدعو إلى تأمُّل واسع الخيال وليس لديه الموارد (أو الصبر) لإجراء القياسات. ذهب واطسون إلى لندن واستمع إلى فرانكلين وهي تتحدّث عن عملها. ثم عاد مسرعاً إلى كامبردج وعمل مع كريك على بناء نموذج اعتبره الاثنان معاً تفسيراً لما استطاع واطسون أن يتذكّره من البيانات التي قدّمتها فرانكلين، ودعا فريق كينغز كولدج لمشاهدة النموذج. وقد أثبت بناء النماذج ـ وهي نماذج ماديَّة حقيقية مصنوعة من الأسلاك والصفائح المعدنية ـ أنه تقنيَّة فعَّالة من أجل توضيح بنية البروتين، وكان كريك وواطسون يتبعان الأسلوب ذاته الذي كان سائداً في ذلك الوقت. وصل فريق كينغز كولدج، وعلى الفور أبدى رفضه للنموذج بحجة أنّه لم يكن يتوافق مع بياناتهم. كما رفضوا أيضاً طريقة بناء النماذج التي تنطوي على إمكانات كبيرة وتبين أنها طريقة مثمرة. وفضلاً عن ذلك، طلب براغ من كريك أن يتوقّفا عن دراسة الدنا ويتخلّيا عنها لفريق كينغز كولدج، لأنها كانت مشروعهم بالأساس. ومنذ ذلك الحين تغيَّرت المواقف حول مفهوم المِلْكيَّة في العلم فضلاً على المواقف تجاه المرأة: وربما ستشكل الخطوة المقبلة نقطة التحوّل لما تقدَّم ذكره.

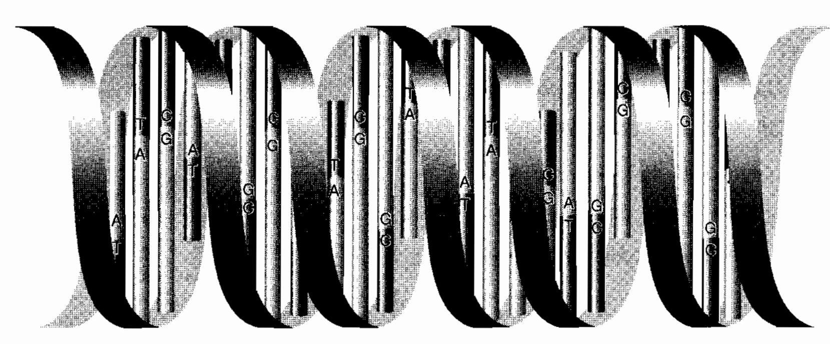
في عام 1952، علم كريك وواطسون أن لينوس بولينغ Linus Pauling، الذي حقَّق نجاحاً في بنية البروتينات وحيثما لم ينجح نصّ براغ، كان يعمل في المسألة. وادعوا أنه إذا كان بولينغ منكباً على المسألة فهذا يعني أنّها تسرّبت بالفعل من كلية كينغز كولدج وأن لهما الحقّ نفسه لدراسة الدنا كأيٍّ شخص آخر. في ذلك الوقت حصل شيء غريب إلى حدّ ما. ففي تلك المرحلة، عرض ويلكنز على واطسون إحدى صور فرانكلين عن انعراج الأشعة السينية من دون علمها (الشكل 2–6) وزوّده ماكس بيروتز كما زوّد كريك بتقرير غير منشور موجَّه إلى مجلس الأبحاث الطبيَّة الذي كانت فرانكلين قد قدّمت فيه معظم ما توصَّلت إليه من معطيات. وفي النهاية أصبح لديهما بعض الأرقام المحدَّدة عن أبعاد الجزيء اللولبي، وتمكّنا من تعديل نموذجهما لكي يتطابق مع هذه القياسات. وفي غضون بضعة أسابيع، تمكَّنا ظافرين من إرسال نموذجهما الشهير إلى ويلكنز الذي قبله. وقد نشرت مجلة Nature ثلاثة بحوث في

الشكل 2-6. إن الجزء الشديد الأهمية من الدليل على البنية التفصيلية للدنا كان نمط الانعراج الذي يشبه الحرف X الذي حصلت عليه روزاليند فرانكلين. وهو يثبت أن للجزيء شكل لولب مزدوج، ويمكن استخدام تفاصيل الصورة في تحديد أبعاد اللوالب.

25 نيسان/أبريل 1953، بحث من كريك وواطسون، وآخر من مجموعة ويلكنز، وثالثٌ من مجموعة فرانكلين (لم تعلم فرانكلين أبداً بأن ويلكنز قد قام بتسريب معطياتها). وقد وفَّر البحثان الأخيران القياسات التي تدعم افتراضات البحث الأول. فشكَّل ذلك التاريخ، أي 25 نيسان/أبريل 1953، ولادة البيولوجيا الحديثة.

إن بنية الدنا هي الآن اللولب المزودج double helix الشهير اليميني الاتجاه والذي أصبح رمزاً كلِّي الوجود، وفيه يلتف خيط طويل من الحمض النووي حول خيط ثان ليشكِّلا معاً زوجاً مجدولاً (الشكل 2-7) يشبه، -من عجائب التقادير- الدرج الموجود في مدخل العموم في متحف الفاتيكان[6]. ومع ذلك فالسمة الأساسية فيه هي أن قواعد النوكليوتيدات في أحد الخيطَيْن تتطابق مع أنواع النوكليوتيدات في الخيط الثاني (الشكل 2-8)، بمعنى أن الأدينين يتطابق دائماً مع التيمين (اللذَيْن نرمز إليهما بالرمزين A...T، وأن الغوانين يتطابق دائماً مع السيتوزين (G...C). وهذا التزاوج يُفسِّر ملاحظة شرغاف في أن مقدار الأدينين في جميع العيّنات مساو لمقدار التيمين، وأن مقدار الغوانين مساو لمقدار السيتوزين: أي أن التزاوج يضمن وجود كميات متساوية. وتجدر الملاحظة

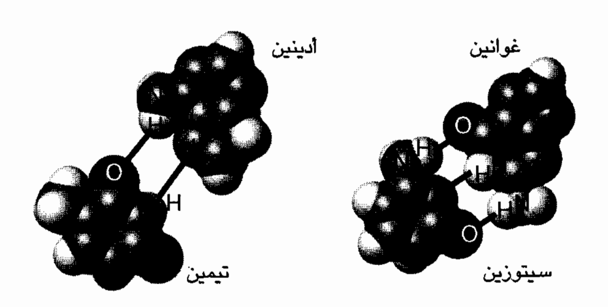
(6) يمكن رؤية صورة اللولب المزدوج هذا على الموقع الإلكتروني: //www.planetware.co/photos/scv/ RVATS3.HTM



الشكل 2-7. اللولب المزدوج للدنا. يلتف خيطا الحمض النووي أحدهما حول الآخر لتوليد لولب مزدوج ملتف، له ثَلْم ضيق وآخر عريض. ويكون الخيطان مربوطين معاً بروابط هيدروجينية موجودة بين القواعد، قاعدة بورينية (A,G) ممثَّلة بالقضبان الطويلة، مرتبطة بقاعدة بيريميدينية (C,T) ممثَّلة بالقضبان القصيرة. ويكون التزاوج دائماً بالشكل A...T و G...C.

أيضاً أن كمية صغيرة نسبياً من البورين (أدينين وغوانين) تتطابق دوماً مع كمية أكبر حجماً من البيريميدين (التيمين والسيتوزين)، لأن اللولب المزدوج يصبح بذلك النحو متَّسقاً: إذ يؤدي البورينان الكبيران إلى انتفاخ النموذج ويؤدي البيريميدان الصغيران إلى تخصّره. ويُفسِّر هذا التزاوج ملاحظة أخرى لشارغاف، هي أن مقدار بورين (A+G) العيِّنة يُعادل مقدار البيريميدين (T+C) فيها.

وينجم الالتصاق بين خَيْطي الحمض النووي عن نوع خاص جداً من الرابطة الكيميائية يُسمَّى الرابطة الهيدروجينية. وعندما أقول خاصّاً فإني لا أعني غير عادي، لأن كلَّ جزيء من جُزيئات الماء في جميع المحيطات يرتبط مع الجزيئات المجاورة له بهذا النوع من الروابط، لذلك هناك نحو 10^{44} منها في المحيطات فقط، إضافة إلى الكثير جداً منها في مواقع أخرى. والرابطة الهيدروجينية هي رابطة خاصة بمعنى أنها تتشكَّل بطريقة غير اعتيادية، وبين أنواع قليلة فقط من الذرّات، من بينها الأكسجين والنتروجين. ولتشكيل رابطة هيدروجينية، تتموضع ذرة هيدروجين (وهي ذرة صغيرة جداً، وبالتالي قادرة على القيام بهذا النوع من العمل) بين ذرَّتين أُخريين وتتصرَّف كنوع من الغراء يربط بعضها ببعض. ومن العوامل الأساسية التي تساعد في فهم اللولب المزدوج ـ كما نُشاهد في الشكل 2–8 ـ أن لكلٍّ من التيمين والأدينين الشكل والترتيب



الشكل 2-8. تزاوج القواعد الذي يربط خيطي الدنا معاً لإعطاء لولب مزدوج. يمكن تمثيل الروابط الهيدروجينية بين الجزيئات بواسطة خطوط. لاحظ أن البورين يقترن بالبيريميدين، وأن الحجم الإجمالي للزوجين هو نفسه تقريباً.

المناسبين لذرّات النتروجين والأكسجين والهيدروجين لتشكيل رابطتين هيدروجينيتين محكمتي البناء. وعلى نحو مماثل، يتوافق السيتوزين والغوانين معاً بشكل محكم البناء أيضاً، ولكن لتشكيل ثلاث روابط هيدروجينية. وهذه الروابط الهيدروجينية أضعف بكثير من الروابط الكيميائية العادية التي تمسك الذرات معاً لتشكيل جزيئات مستقرة، وهذا يعني أن خيطي اللولب المزدوج يمكن أن ينفصلا بسهولة نوعاً ما فيما يبقى خيطا الحمض النووي نفساهما سليمين، تماماً كما يحصل عندما يتبخّر الماء من دون أن تتخرّب جزيئات الماء الفردية.

●

نستطيع أن نتبيّن الآن لماذا كان واطسون وكريك قادرين على إنهاء بحثهما القصير، ولكن الرائع، بالملاحظة الخجولة التالية:

لم يغب عن بالنا أن التزاوج النوعي الذي سلّمنا بصحّته يوحي بوجه مباشر بوجود آلية تناسخ محتملة للمادة الوراثية.

وبالفعل، فإن حقيقة كون نموذجهما يُفسِّر التناسخ بكثير من الإتقان هي السبب الحقيقي وراء القبول السريع جداً له، رغم أن بنية الجزيء التفصيلية

الدقيقة لم تصبح معروفة إلا في أواخر سبعينيات القرن العشرين. ولإدراك منشأ هذه الفكرة الجذّابة والمقنعة، نفترض أن القواعد النوكليوتيدية للخيطين مرتَّبة وفق التسلسل التالي:

...ACCAGTAGGTCA
...TGGTCATCCAGT

حيث يرتبط الحرف الأول A في الخيط العلوي مع الحرف الأول T في الخيط السفلي بروابط هيدروجينية، وكذلك يرتبط C مع G، وهلمّ جرّا. بعد ذلك، نفترض أن الخيطين ينفصلان إلى:

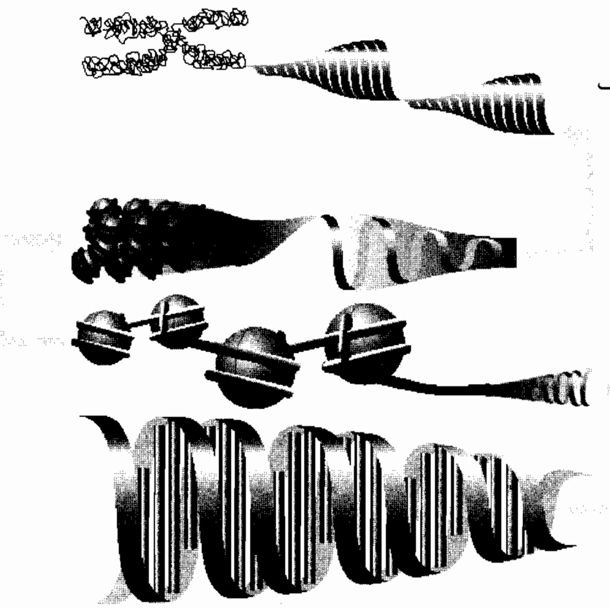
...ACCAGTAGGTCA.. و...TGGTCATCCAGT...

الآن نفترض أن هناك إمداداً من القواعد النوكليوتيدية داخل الخلية. عندئذ سترتبط هذه القواعد بالخيطين المنفصلين بحيث يشكِّل كل منهما مرصافاً (قالباً نمونجيّاً) template لتكوين خيط جديد، ويعطيان:

...ACCAGTAGGTCA		...TGGTCATCCAGT
....TGGTCATCCAGT	و	...CCAGTAGGTCA

أصبح لدينا الآن لولبان مزدوجان متماثلان في حين كان لدينا في الأصل لولب مزدوج واحد. وبذلك نكون قد حصلنا على التناسخ.

عند هذه المرحلة، يصبح من السهل نسبياً إقامة صلة مع النموذج الكروموزومي للتناسل الذي رأيناه في بداية الفصل. وكلُّ ما ينبغي عمله هو أن نتصوّر الصبغي وكأنه شريط من الدنا. عندئذ تصبح عملية الانقسام الخيطي ببساطة ـ كلمة علينا دائماً إنعام النظر فيها ـ تضاعفاً للولب مزدوج.



الشكل 2-9. يخضع اللولب المزدوج لمقدار كبير من الالتفاف والالتفاف المفرط أثناء تكدّسه في نواة الخلية. ويمثّل هذا الرسم تفاصيل عملية التكدّس. في الأسفل نشاهد لولب الدنا المزدوج نفسه. يلتف ذلك الجزيء حول جزيئات الهستونات، الممثَّلة هنا بشكل كرات، ويلتفّ الدنا الملتفّ الناتج لإنتاج ترتيب لولبي التفافي يظهر في الصف الثالث من الرسم . وتلتفّ هذه البنية اللولبية حول نفسها مراراً، لإنتاج رزمة فائقة الالتفاف من الجزيئات، ويلتف الجزيء الفائق الالتفاف حول نفسه لإنتاج الصبغي (الكروموزوم) الظاهر في أعلى الرسم.

لِنَعُدْ الآن إلى كلمة «ببساطة». إن إحدى المشكلات التي تواجهنا هي أن جزيء الدنا طويل جداً: فإذا مددنا الدنا البشري الموجود في مجموعة واحدة من ثلاثة وعشرين صبغياً (في كل صبغيٍّ جزيءُ دنا واحد) ووصلناها بعضها ببعض، حصلنا على خيط طوله متر واحد تقريباً، وتكون كلّ تلك المادة محصورة في نواة الخليَّة البالغة الصغر. وبما أن الصبغيات مزدوجة، وأن هناك نحو مئة تريليون خلية في جسم الإنسان، فإن الطول الكلي للدنا في داخل كلٍّ منا هائل للغاية. تذكّر المئتي خلية التي احتجنا إليها لتغطية نقطة: فهذه الخلايا تحتوي على زهاء 400 متر من الدنا. ولتحقيق هذه المأثرة الرائعة في التكدّس، يلتفّ اللولب المزودج حول تجمّعات كبيرة من جزيئات البروتين التي تُسمَّى هستونات histones وتقوم مقام المغازل. بعد ذلك تقوم هذه المغازل بالالتفاف بعضها على بعض. إن هذه اللفة نفسها تلتفّ ـ لتصبح لفّةً فائقة ـ حول نفسها. وتحدِّد درجة تراصّ اللفة ما إذا كانت الصبغيات محزومة جيداً كما يحصل أثناء

الانقسام الخيطيّ، أو متمدّدة عبر النواة كما تكون عليه في بقية مراحل حياة الخلية (الشكل 2-9).

يوجد في دنا الإنسان نحو 3 بلايين زوج من القواعد، أما في الفيروس الصغير فلا يوجد سوى خمسة آلاف زوج تقريباً. وقد يبعث هذا المستوى من التعقيد الفخر والاعتزاز فينا. لكن سنعود إلى حجمنا الحقيقي عندما نعرف أن جينوم سمندل الماء newt يحتوي على 20 بليون زوج من القواعد، وهذا يعيدنا إلى حجمنا الحقيقي. قد نتخلص من هذا الإرباك بوسائل حاذقة ملتوية، على طريقة سمندل الماء، ونقدم الحجج بأن أعداداً كبيرة من الدنا فائضة عن الحاجة. ويفترض بأن دنا سمندل الماء فائض على الحاجة بوجه خاص، وأن من الممكن أن يكون قد ارتفع إلى هذا المستوى العالي عندما اعتمد نوعه في مرحلة متأخرة من تطوّره مجموعة مستنسخة من الصبغيات في خلاياه (أي أصبح مثلنا «مضاعف الصيغة») بعد أن كان منسجماً مع مجموعة مفردة (أي أنه كان «أحادي الصيغة» مثل الخلية العروسية).

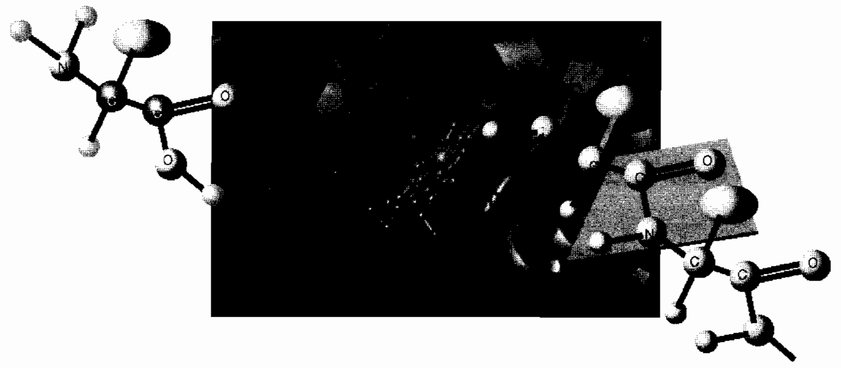
●

جزيء الدنا هو مخزن للمعلومات، وهو في الجوهر رسالة تتناقلها الأجيال. وهذه الرسالة تحتوي على كافة المعلومات اللازمة لبناء الكائن العضوي الذي تقيم فيه وإبقائه على قيد الحياة. الأسئلة البديهية تدور حول طبيعة هذه المعلومات، وكيفية ترميزها (تشفيرها)، وكيفية ترجمتها.

البروتينات هي عاملات النحل في قفير الخلايا الذي تمثِّله الكائنات العضوية الحيَّة. وقد تكون هذه البروتينات بنيويَّة، كما هي الحال في العضلة والغضروف والحافر والمخلب والشعر، أو وظيفيَّة، كما هي الحال في الهيموغلوبين والأنزيمات التي لا تحصى والتي تتحكَّم في العمليات التي تمثل «كوننا أحياء». وتخصيص البروتينات هو الوظيفة المركزية للوراثة، لذا يمكن أن نكون واثقين من أن الدنا هو أحد أشكال المخططات التفصيلية لبروتيناتنا أو الوصفة الخاصَّة لإعدادها. وهذا مؤكَّد من الناحية التجريبية، لأن أي تحوير للدنا

يؤدي إلى تغيرات في البروتينات. وفي معظم الأحيان، ينتج من هذا التحوير خلل في وظيفة البروتينات، نسميه مرضاً. وأحياناً، يكون التحوير مفيداً، وبهذه الحالة يَرقَى المرض إلى مرتبة التطوّر.

كما أشرنا سابقاً، فإن جميع البروتينات هي سلاسل من جزيئات صغيرة تُسمَّى "حموضاً أمينيَّة"، ولها الهيكليَّة الأساسية المبيَّنة في الشكل 2–10. وبصيغة أكثر حِرفيّةً نقول إن البروتين هو عديد ببتيد polypeptide، وأن البروتينات النموذجية هي عديدات ببتيد مؤلَّفة من نحو مئة وحدة من الحموض الأمينية (يصل عددها في البروتينات البنيوية إلى آلاف). والمعروف أن العدّة الكاملة المؤلفة من نحو 30 ألف بروتين مختلف في جسم الإنسان مكوَّنة من



الشكل 2-10. يتكوَّن البروتين من الحموض الأمينية التي تتميّز جميعها بالبنية العامة المبيَّنة إلى يسار هذا الرسم. ومع أن الشكل الإهليلجي الرمادي يكون مختلفاً في كل حالة، إلاَّ أن لجميع الحموض الأمينية المستخدمة في البيولوجيا هذا التصميم الشائع. عندما يرتبط حمضان أمينيان معاً، ترتبط ذرّة الكربون الموجودة في المجموعة COOH ـ (إلى يمين الجزيء) بذرّة النتروجين (إلى يسار الجزيء). ويرتبط الكثير من الحموض الأمينية بعضها ببعض بهذه الطريقة، لإنتاج سلسلة طويلة، كما هو مبيَّن في البنية إلى اليمين. وبوجه عام، تُسمَّى هذه السلسلة عديدة الببتيد، وإذا اقتصرت على ارتباط حمضيْن أمينيين فقط تسمّى ثنائية الببتيد. والمجموعة -CONH- المشار إليها بالسطح الخفيف التلوين على السلسلة هي الرابطة الببتيدية. ونقول إن «فُضالة» أو متبقٍ ببتيدي واحد (ما تبقّى من جزيء الحمض الأميني) يرتبط بمتبقٍّ آخر بواسطة رابطة ببتيديَّة. وعادة تنفتل السلسلة الطويلة متحوّلة إلى لوالب، كما تبيِّن قطعة الهيموغلوبين الظاهرة في خلفية الرسم، حيث تدل اللوالب الظاهرة هناك على شكل أشرطة إلى سلاسل متعدِّدة الببتيد.

عشرين حمضاً أمينياً مختلفاً فقط، لذا يجب على جزيء الدنا أن يُحدِّد التسلسل الذي ينبغي أن ترتبط بموجبه هذه الحموض الأمينية العشرين أحدها بالآخر. وبالمناسبة، قد يكون هناك متَّسع للتحسين هنا. ومع أن الكائنات العضوية مبنيَّة من هذه المكوِّنات العشرين، إلَّا أن هناك عدداً لا متناهٍ من الحموض الأمينية الأخرى، وإذا أرادت "الطبيعة" أن توسِّع مخزونها (وربما فعلت ذلك سابقاً على كواكب أخرى)، فباستطاعتها عندئذٍ أن تفتِّش في نفايات البيئة عن حموض أمينية أخرى .قد تكون الحياة على كواكب أخرى مبنية فعلاً من حموض أمينية مختلفة، فنضطر عندئذٍ أن نتنبَّه لما نأكل عندما نذهب إلى هناك. والواقع أن الطبيعة تقدَّمت تدريجياً نحو التوسّع على الأرض، لأن الحمض الأميني الواحد والعشرين، أي السلينوسيستيين، الذي تحلّ فيه ذرة السلينيوم محل ذرّة الكبريت، ضروري أحياناً لبعض الأنزيمات التي تساعد في حماية الخلايا من أخطر العناصر على الأرض، أي الأكسجين. وإذا اتفق أنك كنت تقرأ هذا الكتاب في شمالي وسط الصين، فقد تكون أمام مشكلة، لأن التربة هناك فقيرة جداً بعنصر السلينيوم، ما يعرّضك للإصابة بمتلازمة كاشين ـ بك Kashin-Beck، التي تتمظهر كمشكلات عضلية.

ولأن جزيء الدنا يتألَّف من نسق من النوكليوتيدات A و C وG وT، فمن الطبيعي أن نفترض أن هذه الأخيرة هي «حروف» جمعت معاً في «كلمات» تُسمَّى الروامز (ج. رامزة) codons، مهمتها تحديد التسلسل الذي ينبغي أن ترتبط بموجبه الحموض الأمينية. ولأن هناك أربعة حروف فقط، بينما نحن بحاجة إلى تحديد عشرين حمضاً أمينيًّا، إضافة إلى حاجتنا إلى مؤشِّرات إلى بداية التسلسل ونهايته، فمن الواضح أن الراموز (ج. رواميز) code لا يمكن أن يكون مؤلَّفاً من حرف واحد أو حرفين. فالراموز المؤلَّف من حرف واحد لا يمكن أن يحدِّد إلا أربعة حموض أمينية، والراموز المؤلَّف من حرفيْن لا يمكن أن يُحدِّد إلا ستة عشر. أما الراموز المؤلف من ثلاثة حروف، حيث ACG تمثل حمضاً أمينياً وCAT تمثِّل حمضاً أمينيًّا آخر، وهلمّ جرّا، فيمكن أن يُحدِّد حتَّى $4^3=64$ حمضاً أمينياً وعلامات ترقيم، أي أكثر مما هو مطلوب. وبالاشتباه بالبخل الطبيعي الشديد للطبيعة (أي الاستخدام غير الواعي ولكن الفعَّال للموارد

النادرة والتحاشي غير الواعي ولكن الفعَّال للانتشار غير الضروري للطاقة)، يمكن الظنّ بأن الراموز الوراثي (الكود الجيني) هو راموز ثلاثي triplet code، أي راموز قائم على روامز ثلاثية الحروف. ليس هناك من سبب بديهي لاستبعاد راموز متغيِّر تتحدد فيه بعض الحموض الأمينية، بواسطة قاعدتين، وبعضها الآخر بواسطة ثلاث قواعد، وهلم جراً. لكن الطبيعة لا تقرّ بهذا الحلّ غير الأنيق، ولحسن الحظ يبدو أن العاملين الأوائل الذين شرعوا بتفكيك الكود الوراثي لم يستكشفوا ذلك الدرب المسدود. إحدى ميِّزات الراموز (الكود) الثلاثي أنه يسمح للطبيعة بتوسيع مخزونها باللجوء إلى شيء من بعض الإطناب في الراموز لترميز حموض أمينية جديدة. وهناك أصلاً تلميح لكيفية تطوير هذا التوسيع. فقد رأينا للتوّ أن الحمض الأميني الواحد والعشرين، هو السلينوسيستيين، يمكن تضمينه في بعض الأحيان: إذ إن الراموز الثلاثي لهذا الحمض الأميني هو TGA، وهو كود يستخدم أيضاً كعلامة توقّف، ويبدِّل وظيفته تبعاً لتوفّر السلينيوم. فإذا كان السلينيوم مُتوفراً، يقول الراموز TGA عندئذ "استخدم السلينوسيستيين"؛ وإذا لم يكن متوفراً، فهو يقول عندها: «مهلاً، توقَّف عن بناء هذا البروتين».

لقد استكشف مفكِّكو الروامز الدروب المسدودة بالفعل بشيء من الأناقة والدقة العالية، إلَّا أنهم كانوا يقومون بذلك بأسلوب أرسطوي وهم جالسون في مقاعدهم؛ ومرَّة أخرى، هبت التجربة لنجدتهم وأظهرت أن الطبيعة لم تتبنَّ المخطَّطات الأكثر أناقة واقتضاباً التي كان سيختارها البشر فيما لو كانوا هم المسؤولين. لقد كان الكودُ الجيني حلمَ مفكِّكي الروامز، لأن رموز الكود كانت قليلة جداً (أربعة) ولم يكن النتاج ترتيب وحدات وإنما أيُّ خيار من الخيارات العشرين تقريباً. في ذلك الوقت، عام 1953، لم يكن هناك من معطيات تقريباً، لأن أحداً لم يكن يعرف أي شيء عن سلاسل النوكليوتيدات في الدنا، وكانت سلال الحموض الأمينية المعروفة في البروتينات غير كاملة: كان فريدريك سانغر Frederick Sanger (المولود عام 1918) الوحيد الذي أتمّ تقريباً ترتيبه لبروتين الأنسولين (أنجزه عام 1955)، وكان هذا هو كل شيء تقريباً. كان هناك مجال واسع لخيال لا يحدِّه شيء.

لا شك أنه كان للفيزيائي الروسي جورج غاموف (1904– 1968) George Gamov مخيِّلة واسعة النظير لأنه أطلق نظرية الانفجار العظيم Big Bang عن أصل الكون وابتدع نظرية لأصل العناصر. كان شغوفاً بكل شيء، وكان من الطبيعي أن يحوِّل انتباهه نحو أكثر المسائل سخونة في خمسينيات القرن العشرين، ألا وهي مسألة الكود الوراثي. تقدَّم غاموف بفكرة لامعة إذ قال: إن البروتينات تنمو خارج اللولب المزدوج في التجاويف التي لها شكل معيَّن rhombus في أخاديد اللولب. وإن هذه التجاويف تشكِّلها القواعد النوكليوتيدية الأربع، قاعدتان في أعلى وأسفل المعيَّن على خط واحد، وعلى الزاويتين الأُخريَيْن قاعدة من الخيط نفسه وقرينها من الخيط الآخر. وبشكل خلّاق، كان هذا راموز ثلاثي مع أنه يتضمَّن أربعة نوكليوتيدات، لأن الاثنين الأخريَيْن (زوج قواعد متتامِّة مثل A...T) يحسبان واحداً (لأنه إذا كانت إحدى القاعدتين A فإن الأخرى ينبغي أن تكون T). بعد ذلك تصوَّر غاموف أن الحموض الأمينية مستقرَّة في مكانها المناسب وأن أنزيماً يظهر لوصلها معاً. ثم افترض بعد ذلك أن أشكال المعيَّنات التي كانت ترتبط معاً بواسطة الانقلاب أفقياً أو رأسياً ترمز للحمض الأميني نفسه، فكانت النتيجة أن عشرين رامزة codon فقط قد بقيت، وهو الرقم نفسه الذي كان يعتقد أنه يحتاج إليه. لكن النباهة تعثَّرت هنا، لأنه لم يعد هناك إطناب ولا مكان لروامز البدء والإيقاف. فكَّر غاموف، بتفاؤل نابع من الحماسة، أنه لا بدّ من وجود طريقة لحلّ هذه المشكلة.

كان لراموز غاموف المعيَّني خاصيَّة مميَّزة أخرى: فهو راموز متراكب overlapping code، بمعنى أن كل قاعدة نوكليوتيدية تُسهم في الوقت نفسه في الروامز الثلاثة. لذا، فإن التسلسل AGTCTTG يتألف من الروامز **AGT**CTTG وA**GTC**TTG وAG**TCT**TG، وAGT**CTT**G، وAGTC**TTG**. والراموز المتراكب فعَّال ومختصر جداً، وهذا يجعله مرشَّحاً جذّاباً لكي تتبنّاه الطبيعة. لكنّ للطبيعة أفكاراً أخرى. إحدى مشكلات الروامز المتراكبة أن الكثير من سلاسل الحموض الأمينية مستبعدة. فعلى سبيل المثال، لنفترض أننا نريد أن نكوّد ثنائي ببتيد، وهو بروتين بالغ الصغر يتألَّف من حمضيْن أمينيين. وأحد أمثلته عميل

التحلية الأسبارتام (الذي يُباع تحت اسم NutraSweet)، وهو توليف من أشكال معدَّلة قليلاً للحمضيْن الأمينييْن حمض الأسبارتيك والفنيل الانين. ولأنه يوجد في الطبيعة عشرون حمضاً أمينياً، هناك 20 x 20 = 400 ثنائي ببتيد محتمل. ولترميز الحمضيْن الأمينيين براموز متراكب، نحتاج إلى أربع قواعد، مثل CCGA للحصول على **CCG**A للحمض الأميني البرولين (كما حدث فعلاً) و C**CGA** للحمض الأميني الأرجينين. لكن هناك فقط 4 × 4 × 4 × 4 = 256 توليفة ممكنة من قواعد النوكليوتيدات الأربع، لذا لا يمكن ترميز عدد كبير من ثنائيات الببتيد (والأسبارتام واحد منها). ومع ذلك، فقد بدأت هذه التوليفات المحظورة بالظهور، وهذا يدلّ على أن الطبيعة لم تستفد من أناقة الكود المتراكب: فقد كانت بحاجة إلى مزيد من المرونة للقيام بنشاطها في لعبة التطوّر المتطلِّبة التي لا تنتهي. وقد أجرى سيدني برينر Sidney Brenner (المولود عام 1927) التحليل الحاسم لهذه المشكلة: فقد بيّن أن جميع الرواميز المتراكبة الممكنة استُبعدت من قبل سلاسل الحموض الأمينية المعروفة. وقد دُق مسمار افتراضيٌ آخر بقوّة في هذا النعش اليوم وهو أن أيّ تغيير في حرف واحد يمكن أن يؤثِّر في تركيب البروتين لغاية ثلاثة حموض أمينية. وهكذا، إذا طفر الراموز AGTCTTG إلى AGGCTTG، فإنه يمكن أن يتألَّف في هذه الحالة من الروامز **AGG**CTTG، و**AGGC**TTG و AG**GCT**TC، وهكذا، مع ما يستتبع ذلك من عواقب وخيمة محتملة على البروتين، وعلى العضوية، التي لن تتمكَّن غالباً من تحمُّل تغيّر حتّى في قاعدة واحدة.

كان هناك درب مسدود آخر مبطَّنٌ بأفكار مقتضبة وأنيقة كان الفيزيائيون النظريون يحبذونها لكن الطبيعة كانت تقابلها بازدراء. إحدى المشاكلات كانت علامات الترقيم. فكيف نعرف أين نبدأ؟ حتى في راموز غير متراكب، فإن ...AGTCTTG يمكن أن يُقرأ على الشكل ,...AGT)(CTT)(G) أو (...A)(GTC)(TTG)، أو...AG)(TCT)(G... وهكذا دواليك. ويُطلق على الخيارات المختلفة المتمثِّلة بهذه الأمثلة اسم القراءات المُزاحة الإطار للراموز. وكان كريك قد اقترح أن هذه الآليَّة لا توجد في الخلية إلا بالنسبة لروامز معيَّنة وأن الراموز

يجب أن يكون بحيث تصبح مثل هذه القراءات المُزاحة الإطار بلا معنى. في هذا المثال، لنفترض أن القراءة الصحيحة هي ...G)(CTT)(AGT)...، عندئذ يكون AGT و CTT رامزين مقبولين، وتكون القراءتان المُزاحتا الإطار GTC و TCT بلا معنى. وقد وضع لهذا النوع من الروامز مصطلح "خال من الفواصل" comma- free، لأنه يمكن أن يُقرأ بلا لبس من دون علامات ترقيم. وعندما تُدرس الروامز الأربع والستِّين المرشَّحة مع إبقاء هذا التقييد في الذهن، يتبيَّن أن عشرين منها يمكن أن تكون مشروعة، وهو تماماً العدد المفترض المطلوب. على سبيل المثال، يُستبعد TTT لأن التوليفة ...TTTTTT... تنطوي على غموض في قراءة الأُطُر مثل ...(TTT)(TTT)... و ...TT)(TTT)(T... ولأن الراموز يبدو أنه يوفّر تماماً عدد الروامز المطلوبة، ولتجنُّب مشكلة القراءات المزاحة الإطار، فقد قُبِل فوراً واعتمد على نطاق شامل.

لكن الطبيعة لم تقبل ذلك. ففي عام 1961 أبدت اعتراضها على هذا النوع من التأمُّل المتحرِّر، وأوقفت التخيُّلات الخصبة الخلَّاقة التي أهدرت المزيد من الوقت. وقد أشار إلى هذا الاعتراض مارشال نيرنبرغ Mershall Nirenberg وهنريخ ماثهاي Heinrich Matthaei، اللذين بيَّنا أن TTT كانت مع ذلك رامزة مقبولة، وأنها تعني الفنيل ألانين[7]. لذا، فقد خرَّ الراموز الأنيق المقيَّد الخالي من الفواصل صريعاً.

يتبيَّن أن الطبيعة كانت تمارس عملية خداع بأسلوبها المميَّز الظريف اللاواعي. فقد طوّرت أبسط الروامز codes على الإطلاق دون أن تُبالي بمسألة الإطناب، ومن دون مراعاة خاصة لأطر القراءة في الراموز نفسه. والراموز الجيني الفعلي، الذي جُمع تدريجياً في ستينيات القرن العشرين، مليء بدرجة عالية من الإطناب، ويحتوي على ست روامز codons على الأكثر تشير إلى الحمض الأميني نفسه، وثلاث تعني تَوَقّفْ (الشكل 2-11). وهذا الإطناب حاذق جداً، لأنه

(7) لقد درسنا الرنا، الذي لم نتكلم عنه بعد لكن سنفعل ذلك بعد قليل: في الرنا يُستعاض عن التيمين باليوراسيل U، وقد أثبتا فعلاً أن UUU هو كود (راموز) الفينيل آلانين.

الشكل 2-11. الكود (الراموز) الجيني وبنى الحموض الأمينية التي تشير إليها الروامز الثلاثية الحروف. على سبيل المثال، إذا جرت القراءة ابتداء من الوسط، فإن الرامزة UAC ترمز إلى التيروزين (Tyr). لاحظ أن الحرف U يُمثِّل اليوراسيل (الشكل 2–12). تملك جميع الحموض الأمينية التصميم المبيَّن في الإطار الصغير. لاحظ أن بعض الحموض الأمينية موجود في أكثر من موقع واحد وأن الراموز مطنب بدرجة عالية، خصوصاً في حرفه الثالث. فمثلاً تشير جميع الروامز ACG و ACU و ACT وACA إلى التريونين (Thr).

يرتكب «أخطاء» في التناسخ يستبعد أن يكون لها عواقب مميتة. وعلى سبيل المثال فإن CCT و CCC و CCA و CCG ترمز جميعها إلى البرولين، لذا فإن خطأ في نسخ الحرف الأخير غير مهم. وحتى حين يكون تغيُّر حرف واحد مهمًّا، فإن الحصيلة غالباً ما تكون استبدال حمض أميني بحمض مماثل. مثلاً، يؤدي التغيُّر من TTT إلى TAT إلى الاستعاضة عن الفنيل آلانين بابن عمه

التيروزين. ويكون الراموز أمثلياً تقريباً بهذا الصدد. أخيراً، ولأن جميع الروامز الأربع والستين قابلة للحياة، تغتنم الطبيعة فرصتها في التغيير وإجراء التجارب، كما ذكرنا من قبل.

●

أما العقبة الثالثة الواجب تذليلها فكانت مسألة ترجمة الراموز بواسطة الجهاز الموجود داخل الخلية. المشكلة الأساسية هي أن الدنا محصور داخل نواة الخلية في حين أن تخليق البروتينات يحدث في السيتوبلازما المحيطة بها. وجزيء الدنا كبير للغاية بحيث لا يستطيع الخروج إلى السيتوبلازما عبر الغشاء النووي، فكيف إذن يمكن نقل المعلومات إلى حيث يجب استعمالها؟

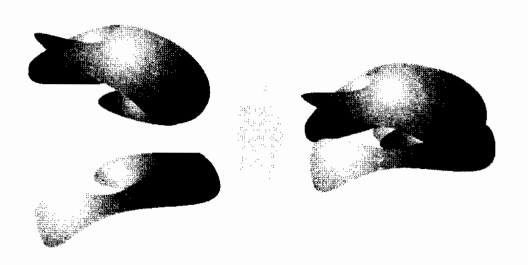
هنا يدخل الحمض الريبي النووي (الرنا) ribonucleic acid، وهو نسخة أكثر بدائية من الدنا. فللحموض الريبيَّة النووية البنية العامة نفسها التي للدنا، التي تتألَّف من عمود فقري من السكر ـ الفسفات تتدلى منه قواعد نوكليوتيدية. غير أن السكر هو ريبوز وليس ريبوزاً منقوص الأكسجين (من هنا حل الحرف «ر» في الرنا محل الحرف «د» في الدنا) لم تفقد فيه ذرة الأكسجين الأصلية للريبوز. ثانياً تمت الاستعاضة عن رنا التيمين بالبيريميدين يوراسيل الكثير الشبه به مع وجود اختلاف دقيق (U في الشكل 2–12). ليس من الواضح تماماً لماذا يوجد U محلّ T أو لماذا يُستخدم الريبوز بدلاً من الريبوز المنقوص الأكسجين في العمود الفقري: إذ يرجَّح أن يكون ذلك ناجماً عن الاختلاف الطفيف في قوى الروابط الهيدروجينية التي يمكن أن يشكِّلها الجزيء. وأحد الاختلافات الرئيسية هو أن الرنا مؤلف من خيط وحيد. ويُفترض بأن الرنا كان المادة الأصلية للتشفير، لكن الدنا الأكثر استقراراً استولى على وظيفته في مرحلة مبكرة من مراحل التطور. وقد وفّر بعض الدعم لهذه الرؤية ملاحظة أن الرنا يمكن أن يتصرَّف أيضاً تصرّف الأنزيم. وهذه الوظيفة تحلّ معضلة واحدة من معضلات أصل الحياة: من وُجد أولاً، الدجاجة (الأنزيمات الضرورية لاستخدام المادة الوراثية) أم البيضة (المادة الوراثية الضرورية لتحديد الأنزيمات).

الشكل 2-12. قاعدة اليوراسيل، U، التي تظهر مكان التيمين في جزيء الرنا. يختلف اليوراسيل عن التيمين بفقدان مجموعة ميتيل (CH_3) عند الزاوية الشمالية الشرقية من الجزيء الأخير. ويشير السهم إلى نقطة الارتباط بالريبوز ويشير الخطّان المنقّطان إلى موقع الروابط الهيدروجينية التي يشكّلها الجزيء مع الأدينين.

هناك نوعان رئيسيان من الرنا، وتحديداً الرنا ـ الرسول (mRNA) والرنا ـ الناقل (tRNA). سنركّز في البداية على الرنا ـ الرسول لأنه ينقل المعلومات المرمّزة في الدنا إلى السيتوبلازما. ولالتقاط الرسالة، يتم تصنيع الرنا الرسول مثلما يستنسخ الدنا، وذلك من خلال عرض خيط واحد للدنا مع أنزيم، هو بوليميراز الرنا، باستخدام ذلك الخيط كمِرْصاف (قالب نموذجي) template لإنتاج الرنا ـ الرسول. ويُستخدم في عملية النسخ خيط واحد فقط من الدنا، لكن ليس بالضرورة الخيط نفسه الذي استُخدم في كامل الصبغي، ويحدث النسخ دائماً بالاتجاه نفسه على طول الخيط (ولذلك لا نحصل على ما يماثل موسيقى بيتهوفن بالعكس). وتتقدم عملية النسخ تقريباً بسرعة مدفع رشاش: إذ يستنسخ بوليميراز الرنا من الفقاريات نحو ثلاثين قاعدة في الثانية، ويحتاج إلى نحو سبع ساعات لاستنساخ متمم كامل لدنا في الخلية. ومع أن قاعدة واحدة تقريباً من أصل مليون تُنسخ بطريقة خاطئة، إلّا أن الأنزيمات المصحِّحة للأخطاء تبقى يقظة وتُصحِّح معظم الأخطاء بحيث لا يبقى إلا خطأ واحد تقريباً في كل 10 بلايين قاعدة. وعندما يصل النسخ إلى رامزة «التوقف»، يتوقّف تكوّن الرنا الرسول ويُنقل بعيداً عن الدنا ويخرج عبر مسام الغشاء النووي إلى السيتوبلازما، حاملاً معه معلوماته الثمينة.

هنا تكون الريباسات (الريبوسومات) ribosomes واقفة بالمرصاد (الشكل 2-13). وهذه العُضيَّات الدقيقة المخادعة (مكوِّنات متخصِّصة في الخلية ذات وظائف نوعية) هي تجمُّعات من البروتين والرنا تكمن كبقعتين صغيرتين منفصلتين، ثم تتحد في وحدة وظيفيَّة مفردة عندما ترتبط بالرنا الرسول الذي ينبثق من نواة الخلية إلى عالم السيتوبلازما المحفوف بالمخاطر من الناحية الكيميائية. أما المكوِّن الآخر للسيتوبلازما الذي علينا التنبُّه إليه في هذه المرحلة

فهو الرنا الناقل، أي الحمض النووي الذي يقوم بالبناء الفعلي للبروتين. ويبيِّن الشكل 2-14، بطرق شتَّى، شكل جزيء الرنا الناقل tRNA، الذي يتألَّف من جزأين مهمَّين. الأول هو حلقة مقابِلةُ الرامزة anticodon، وهي قطعة صغيرة تتعرَّف إلى الرامزة في الرنا الرسول. فعلى سبيل المثال، إذا كانت الرامزة CGU،



الشكل 2-13. يتألف سكر الريبوز من مكوِّنين مختلفي الحجم يتحدان معاً لتشكيل وحدة مستقلة (إلى اليمين) أثناء حدوث عملية الانتساخ. تمثِّل كل وحدة مصنعاً صغيراً. وتتألَّف الوحدة الكبيرة، نموذجياً، من جزيئي رنا ريباسي (rRNA) يبلغ طولهما على التوالي 2900 و 120 قاعدة، ومن نحو اثنين وثلاثين بروتيناً مختلفاً، بنُسخ مفردة في معظم الحالات. ويوجد في الوحدة الصغيرة جزيء رنا ريباسي واحد طوله نحو 1540 قاعدة ونسخة واحدة من جميع البروتينات الواحد والثلاثين المختلفة.

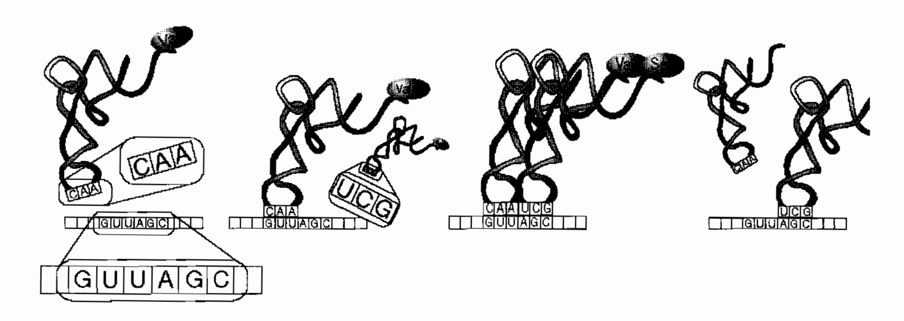
وتكوِّد الحمض الأميني الأرجينين، فإن مقابِلة الرامزة ستكون التسلسل المتمِّم GCA الذي يستطيع إيجاد الرامزة CGU بمطابقة الروابط الهيدروجينية والالتصاق بها مثلما تلتصق شريحتي اللبّاد "فيكرو" إحداها بالأخرى. والجزء الثاني المهم هو "موقع ارتباط attachement site" الحمض الأميني عند نهاية سلسلة الحمض النووي. وهو الجزء الآخر الشبيه بلبّاد فلكرو من الجزيء، وله تسلسل من النوكليوتيدات التي يمكن أن تلتصق بحمض أميني واحد فقط، هو الأرجينين في هذه الحالة.

نستطيع الآن أن نتخيَّل ما يحدث داخل السيتوبلازما. بعد أن تثبت بإحكام ريباسة على قطعة من الرنا الرسول تتوقَّف الريباسة قليلاً فوق الرامزة الأولى،



الشكل 2-14. جزيء الرنا الناقل (tRNA). الجزيئات الحيويَّة معقَّدة جداً، وتُستخدم في وصفها أشكال تمثيليَّة متنوِّعة، تبعاً للسمات التي يُراد إبرازها. نرى إلى اليسار تصميماً تخطيطياً لمواقع القواعد (المربَّعات) والشكل العام للجزيء. أما مقابِلة الرامزة فهي الجزء المستخدم في سلسلة الروامز في الرنا الرسول والحمض الأميني المناسب المرتبط بالموقع المبيَّن. ويُظهر الرسم الثاني الروابط الفردية في جزيء رنا ناقل حقيقي (وهو هنا رنا خميرة الفينيل ألانين). ولمساعدة العين، يصوِّر الرسم الثالث العمود الفقري للبنية الواقعة فوق بنية الخطوط. أخيراً، يُظهر الرسم الرابع جميع الذرّات، ويعطي فكرة عن الشكل الفعلي الممتلىء الحجم للجزيء، لكن يصعب تحديد التفاصيل (إلا بواسطة جزيئات أخرى).

وتجرِّب مجموعة متنوعة من جزيئات الرنا الناقل حظَّها، مع أنها تملك مقابلة الرامزة الخاطئة للالتصاق (الشكل 2–15). بموازاة ذلك يتقدَّم جزيء رنا ناقل ذو مقابلة رامزة لِـ GUU وفالين ملتصق على موقع ارتباطه. يلتصق هذا الجزيء، وبعمله هذا يمكِّن الريباسة من أن تسقط في مكانها على الرامزة التالية، التي يمكن أن تكون AGC. وفي الوقت المناسب، يأتي رنا ناقل ذو مقابلة رامزة مطابقة لِ AGC، حاملاً معه جزيء السيرين الذي اصطدم به وحجزه في مكان آخر في السيتوبلازما. ترتبط مقابلة الرامزة بالرامزة، محضرة جزيء السيرين الخاص بها إلى جوار جزيء الفالين؛ ويقوم أحد الأنزيمات بتخليص جزيء الفالين من الرنا الناقل ويربطه بجزيء السيرين، مشكّلاً بذلك ثنائي الببتيد فالين - سيرين، وينتقل الرنا الناقل المحرَّر الأصلي بتمهّل في المحلول في بحث غير واعٍ عن فالين آخر. وبعد أن تسقط الريباسة في مكانها على الرامزة التالية، تتكرَّر العملية. وتدريجياً تنمو سلسلة البروتين وتتحوَّل المعلومات الموجودة أصلاً في دنا النواة إلى بروتين وظيفي. وتأخذ الحياة مجراها.



الشكل 2-15. تخليق البروتين بتوجيه من الرنا ـ الرسول (mRNA، مجموعة الأحرف على الشريط) وفعل من الرنا ـ الناقل (tRNA). يحدث الفعل في داخل إحدى الريباسات غير الظاهرة في الرسم. يحطّ الرنا ـ الناقل ذو مقابلة الرامزة CAA والمحمَّل بجزيء فالين على سلسة الروامز GUU. سرعان ما يهيم رنا ناقل آخر ذو مقابلة الرامزة UCG ومحمَّل بجزيء سيرين ويستقرّ على رامزته، أي السلسلة AGC. بعد ذلك تنضمّ الأنزيمات إلى جزيء الفالين والسيرين لتوليد ثنائي الببتيد فالين ـ سيرين، ويطفو الرنا الناقل CAA المحرَّر بعيداً ليلتقي بجزيء فالين آخر في مكان ما، وتنتقل الريباسة إلى الرامزة التالية وتنتظر قدوم جزيء الرنا الناقل المناسب وحمضه الأميني. بهذه الطريقة تبنى سلسلة ثنائي الببتيد وفق الترتيب الذي يُحدِّده الرنا ـ الرسول.

حتى الآن، يمكننا تلخيص القصة على النحو التالي. يتمثل الاعتقاد الرئيسي لعلم الوراثة بأن تدفُّق المعلومات والنشاط يكون على الشكل التالي: الدنا ← الرنا ← البروتين. ونادراً جداً ما تنتقل المعلومات من الرنا إلى الدنا (كما سنرى لاحقاً). والعجز المفترض للبروتين في التأثير في جزيء الدنا يتوافق مع عدم صحَّة توراث الخصائص المكتسبة في نظرية لامارك (كما عرضت في الفصل الأول).

ينبغي الآن أن تكون الأهمية الكبيرة لمعرفة بنية الدنا واضحة، برغم وجود الكثير من النهايات المبهمة التي ينبغي التطرّق إليها. ومع إنّي أطلق عليها تعبير نهايات مبهمة، إلَّا أنها في الحقيقة جبال من النشاط الراهن وعالم لا ينتهي من البحوث الجارية.

أولاً، هناك الصلة بعملية التطوّر، الأساس الجزيئي للمواضيع التي سبق أن

بحثناها في الفصل الأول. قد لا تكون عمليتا التناسخ والانتساخ مثاليتين إطلاقاً: فحتّى النوكليوتيدات والحموض الأمينية يمكن أن ترتكب أخطاء وهي تتلمَّس طريقها بشكل أعمى، فتستجيب للشكل والشحنة الكهربائية، وتتلاءم بقدر المستطاع، لكنها تعلق أحياناً في الموقع الخاطىء ولا تستطيع أن تتراجع عن خطئها قبل أن تتثبَّت في موقعها لدى وصولها التالي أو تشكّل رابطة. وقد يتناسخ الدنا بطريقة خاطئة عندما يشكّل الجيل التالي، أو يرتكب جزيء الرنا الرسول خطأ عندما يقرأ الدنا، أو يرتبط جزيء رنا ناقل بالرامزة غير الصحيحة، حتّى أن الرنا الناقل المرتبط بطريقة صحيحة قد ينتج عنه حمض أميني خاطىء. ومع ذلك، فجميع هذه الحالات، ما عدا الأولى، هي حالات عابرة، إذ إنها تؤثّر في الخلية وليس في الجسم كلِّه. الخطأ الأول فقط، الذي يُسمَّى طَفْرة جسديَّة somatic mutation، يؤثِّر في كامل الجسم، لأن أي خطوة خاطئة في بداية تطوّر العضوية ستتناسخ وتتضاعف لتملأ الجسم كلَّه. وعندما يحدث الانقسام المنصِّف وتتشكَّل الأعراس، يدخل الدنا الطافر هناك إلى خط الإنتاش ويصبح جاهزاً للانتقال إلى ذلك الامتداد المنجز بذكاء في الجسم، أي إلى الجيل الثاني. ويُطلق على هذا النوع من الطفور اسم الطَفْرة الإنتاشية أو الجرثومية germinal mutation.

من الواضح أن التناسخ عمل خطر، وقد يسلك الكثير من الأمور طريقاً خاطئاً. ويمكننا أن نكون واثقين بأنه عملية مستقرَّة بشكل معقول، برغم ظهور بعض الطفرات النادرة، وإلَّا لما كُنّا موجودين هنا. ولا ريب أنه سيأتي يوم سنختفي (نوعنا) فيه من الوجود. ومن أسباب العمر المديد للدنا أن لكل خلية سياستها وجهاز ترميمها المتطّورين القادرين على تحديد الطفرات وتصحيحها. وهناك سبب آخر أيضاً هو أن الدنا يحتوي على كثير من الرمم، وهي مناطق تسمى الإنترونات introns ترافقنا في مشوارنا الطويل ولا ترمز إلى شيء (لا تتجلّى بشيء). أما الأجزاء المهمَّة في الدنا فتسمَّى الإكسونات exons، وهي مناطق الترميز الفعَّالة. وإذا حدثت الطفرات في الإنترونات فلن تترتَّب أيَّة عواقب على العضوية لأن تلك المادة الوراثية لا تتجلّى على شكل بروتين. ولحسن

الحظ فإن قسماً كبيراً من الدنا البشري هو رَمَمُ إنترونات، ذلك أن الطبيعة بأسلوبها الذي نصفه بالأناقة والاقتضاب، بينما هو في الواقع جدير بالازدراء، لا تكلِّف نفسها عناء التخلّص من هذا الرّمم عندما يصبح لا فائدة منه، بل تنقله عبر الأجيال. هذا غريب إلى حدٍّ ما، لأنه يعني أن معظم ذلك المورد الثمين، أي الطاقة، يذهب عَبَثاً. ربما يكون لهذا الرّمم وظيفة لم ندركها بعد. وربما هي الطريقة المثلى لضمان انتشار المعلومات عبر الأجيال، من دون أن تعرِّض نفسها للمخاطر التي ترافق الأنشطة العلنية. قد يكون دنا الرّمم معلوماتٍ خالصة وأبديَّة لا تتجلّى بشيء ولا غرض لها سوى وجودها العديم الجدوى. وهذا الدنا العديم الجدوى ناجح جداً، لأن نحو 98% من الدنا الذي نحمله بشيء من المشقَّة هو رمم، و2% منه فقط مفيد بمعنى أنه مرمَّز لصنع البروتينات.

من السهل أن نتخيُّل مجموعة متنوّعة من طفرات الدنا. فالاستبدال القاعدي مثلاً هو الاستعاضة عن قاعدة بأخرى. وبعض الاستبدالات القاعدية تكون مكتومة بمعنى أن الرامزة الطافرة ترمّز القاعدة نفسها مثلما ترمِّز القاعدة الأصلية، ولذا يكون البروتين الناتج غير متأثِّر. ومع ذلك هناك استبدالات قاعدية أخرى يمكن أن تغيِّر الرسالة، وتتوقف خطورة التأثير على درجة اختلاف الحمض الأميني المستبدَل عن الحمض الأصلي في البروتين. وطفرات الإضافة addition mutations أو طفرات الحذف deletion mutations هي إضافات أو حذوف لأزواج كاملة من القواعد: إذ يمكن أن تشوّش على ترجمة الدنا لأنه بدلاً من أن تقرأ ...ATGGTCT... بالطريقة ...(ATG)(GTC)(T... فإن حذف الحرف T الثاني يؤدي إلى قراءتها بالطريقة ...)(ATG)(GCT)... وانطلاقاً من ذلك يمكن أن يتغيَّر البروتين كُليًّا ويُصبح غير وظيفي. من ناحية أخرى، قد تساعد هذه الطفرة على تقوية فكي الفهد الصياد أو زيادة الإحساس الشمِّي للغزال.

يمكن أن تكون الطفرات عفويَّة أو محرَّضة. وتحدث الطفرات العفوية أو التلقائية بمعدِّل ثابت، وتؤلِّف ساعة جينية جزيئية تُتكتك بانتظام داخل الغلاف الحيوي. ويكون معدل الطفور في جين معيَّن ثابتاً تقريباً، ولذا يمكننا من خلال ملاحظة عدد الاختلافات بين نوعَيْن من الحموض الأمينية أن نستنتج المدَّة

الزمنية التي افترقا عندها من سلف مشترك. وقد تطرَّقنا إلى هذا النوع من المعلومات في الفصل الأول، حين ذكرنا أن التطوّر عملية يمكن التنبّؤ بها، حيث لا توجد حالة تملك هذا النوع من المعلومات تتعارض مع المعلومات عن تسلسل النوع. كما أن الساعة الجزيئية تضفي على المخطَّطات التي تصنّف السلالات بحسب تواريخ نشوئها (الجزء الممثل بالشكل 1-2) وصفاً كمياً، بربطها بمقياس زمني. وقد تُحرَّض الطفرات أيضاً بتأثير عوامل بيئيَّة خارجة عن السيطرة، كالتعرُّض للأشعة النووية أو فوق البنفسجية، أو تناول موادّ كيميائية، أو التأكسد بعيِّنات مفوَّعة تحتوي على أكسجين مثل جذر فوق الأكسيد (جزيء أكسجين مع إلكترون إضافي): وهذا هو الثمن الذي ندفعه من جرّاء استخدام الأكسجين والسعي يجهد من أجل العمر المديد.

ومع أن المبدأ المركزي يُحَدِّد سريان المعلومات من الدنا عبر الرنا إلى البروتين، إلا إننا نلاحظ فعلاً أن هناك بعض الاستثناءات. فالفيروس القَهْقَري retrovirus يحتوي على جزيء رنا وحيد الخيط يستخدمه في صنع جزيء دنا مزدوج الخيْط تستخدمه الخلية المضيفة من أجل انتساخها. والمعروف أن فيروس العوز المناعي البشري (HIV)، وهو الفيروس الذي يُسبِّب متلازمة العوز المناعي المكتسب (الأيدز)، هو فيروس قَهْقَريٌ: يهاجم الجهاز المناعي ويُعرِّض الجسم لعدوى لا يمكن مكافحتها. وكان هذا الفيروس قد عُزل عام 1983 على يد كل من لوك مونتانييه Luc Montagnier من معهد باستور في باريس، وروبرت غالو Robert Gallo من المعهد الوطني للسرطان في الولايات المتحدة الأمريكية، وجاي ليفي Jay Levy من جامعة كاليفورنيا بسان فرانسيسكو. يرتبط فيروس الإيدز بالخلايا اللمفية التائية T-Lymphocytes، وهي نوع من خلايا الدم البيضاء، ناقلاً إليها الرنا الخاص به وأنزيماً متخصِّصاً يُسمَّى الناسِخة العكسية reverse transcriptase. يصل هذان الجزيئان إلى جوار جزيء الدنا في الصبغي فيقوم الأنزيم بتخليق نسخة دنا للرنا الفيروسي ونسخة من هذا الدنا الحديث الصنع. عند هذه المرحلة يُصبح هناك نسخة دنا مزدوج الخيط للرنا الفيروسي. يدخل هذا الدنا في دنا الخلية المضيفة حيث يتم تخليق الرنا الرسول

الفيروسي انطلاقاً من ذاك الدنا باستخدام آلية انتساخ الخلية. بعدئذ، تُترجم التعليمات التي يحملها الرنا الرسول الفيروسي لصنع البروتينات اللازمة لتكوين مزيد من الجسيمات الفيروسية (اللب والغلاف). ثم تبدأ هذه الدقائق بالتبرعم من الخلية، مستولية على جزء من الجدار الخلوي تشكِّل منه غشاءها الواقي. تستأصل هذه العملية سطح الخلية اللمفيَّة وتقتلها في الوقت المناسب، الأمر الذي يُقَلِّل من مناعة العضوية تجاه أي هجمة لعداوي أخرى. ويُعتقد أيضاً أن الفيروس القهقري هو عامل مُسبِّب لمجموعة متنوّعة من السرطانات، بما فيها السرطانات التي تصيب البشر.

أما أنزيم الاقتطاع أو التحديد restriction enzyme فهو أنزيم تنتجه أنواع مختلفة من الجراثيم، ويمكنه تعرّف نسق معيَّن من القواعد النوكليوتيدية في جزيء الدنا وقطع الدنا في هذا الموقع. ويمكن أن تُجمَّع الشُدَف التي تنشأ بهذه الطريقة وتُربط معاً بواسطة أنزيمات أخرى تُسمَّى الليغازات ligases. أما قِطَع الدنا التي تُنتسخ بصورة مستقلَّة عن الدنا في الخلية المضيفة حيث تنمو فتسمَّى النواقل vectors؛ وهي تشمل البلازميدات plasmids، وهي جزيئات الدَنا الدائرية الموجودة في البكتيريا. وتُسمَّى جزيئات النواقل التي تشمل أجزاء دَنا مُقحمَة الدنا المأْشُوب recombinant DNA. تبني هذه النواقل نسخاً عديدة لقطعة معيَّنة من الدنا، مضخِّمةً بذلك المادة الأصليَّة ومنتجةً مقادير كبيرة من نسيلة الدنا DNA clone. ويمكن أن يشكل أفراد المستعمرة المتشكّلة المُنتج المُراد، كما يحدث في إنتاج الأنسولين بالهندسة الوراثية، أو- كما في المعالجة الجينية - حيث تُقحم مجدَّداً في العضوية الأصلية.

وهناك طرق أكثر حداثة لتحوير الدنا تشمل الطريقة المباشرة في الزَّرْق المِكْرَويّ microinjection الذي يقضي بحقن مادَّة وراثيَّة تحتوي على الجين الجديد في الخليَّة المُتلقِّية بواسطة إبرة زجاجية ذات رأس دقيق. تتولى الخلية مهمة السَّهر على ممتلكاتها (أو على الأقل على ممتلكات عضوية أخرى) وتوفّر آلية لإدخال الجينات المحقونة باتقان إلى نواة الخلية المضيفة ودمجها فيها. ويمكن أيضاً دمج الجينات بإحداث مسامّ في غشاء الخليَّة والسماح للجينات الوافدة بشقّ طريقها

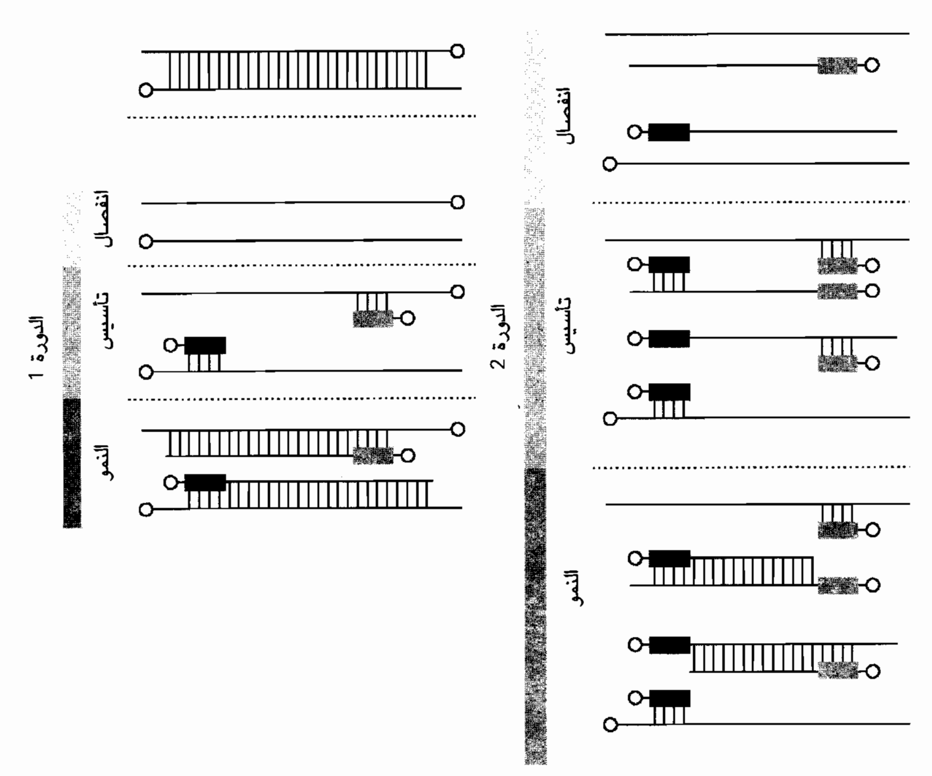
إلى داخل الخليَّة. في التكوين الكيميائي للمسام تُغمر الخلايا في محاليل لموادّ كيميائية خاصَّة؛ أما في التكوين الكهربائي للمسام electroporation فتُعرَّض الخلايا لتيار كهربائي ضعيف. وإذا كنت تعتقد أن كلاً من هذين الأسلوبين راقٍ وبالغ الدقة، يمكنك عندها اللجوء إلى طرق القذفيّات الحيوية bioballistics، حيث تُكسى شظايا معدنيَّة صغيرة بمادة وراثيَّة ثم تُقذف ببساطة إلى داخل الخلية. وقد ذكّرني هذا بمشهد في أحد أفلام إنديانا جونز، أطلق في نهايته جونز النار على خصمه من غير اكتراث، بعد أن كان هذا الخصم قد أدّى دوراً رائعاً في المبارزة بالسيف.

وبالحديث عن إطلاق النار، هناك نتيجة مهمَّة أخرى لفهم الدنا تتمثَّل في التطبيق الجنائي الذي يتخذ شكل تحديد مواصفات الدنا DNA profile، أو بعبارة أقل دقة، تحديد بصمة الدنا DNA fingerprinting. وكانت بصمات الأصابع الحقيقة، وهي الأشكال التي تخلّفها الثنيات الجلدية للإبهام، قد اقترحت عام 1880 من قبل هنري فولدز Henry Faulds، وهو طبيب اسكتلندي يعمل في طوكيو، كوسيلة لتحديد هويَّة المشبوهين، ثم استخدمت بعد ذلك بوقت قصير لتخليص مشبوه بريء وتحديد الجاني في جريمة سطو حدثت هناك. بعد مئة سنة، انتقلت عملية التعرُّف إلى الشخص من رؤوس أصابعه إلى كلِّ خليَّة في جسمه، مع ابتكار ما يُعرف «ببصمة الدنا» من قبل أليك جيفري Alec Jeffries عام 1984 من جامعة لايسستر. ونحن بحاجةٍ إلى معرفة خاصيتين في هذه التقنية: الأولى تكبير مقادير بالغة الصغر من الدنا؛ والثانية البصمة الحقيقية للإصبع. ويعدّ تحديد مواصفات الدنا تقنية مهمَّة جداً في الطب الجنائي، واختبار الأبوَّة، والدراسات التطوّريَّة، والتي شهدت تقدُّماً هائلاً خلال العشرين سنة الماضية، وتخللها ضروب متنوّعة من الصفات المميزة المستخدمة في ظروف مختلفة. وفيما يلي نرسم صورة سريعة لمقاربة نموذجية.

زعم كاري موليس Kary Mullis (المولود عام 1944)، مبتكر التفاعل المتسلسل للبوليميراز Polymerose chain reaction (PCR)، أن تلك الفكرة خطرت على باله عام 1983 أثناء نزهة بالسيارة في ضوء القمر في جبال كاليفورنيا، لا بدّ أنها كانت من أجمل الطرق للفوز بجائزة نوبل. لنتذكَّر أن

البوليميراز هو الأنزيم الذي يُساعد في نسخ خيط (طاق) الدنا عن طريق استخدامه كمرصاف template؛ ويُمكن استخدام الأنزيم نفسه في أنابيب الاختبار in vitro. ولكي ينجح ذلك يحتاج الأنزيم إلى إمداد وافر من القواعد النوكليوتيدية ومُشَرِّعَيْن (بادئين) primers، والمُشَرِّع هو شُدْفَة قصيرة من طاق الدنا تتألَّف من نحو عشرين نوكليوتيداً. أولاً يُفصل خيطا الدنا ("ينصهر الدنا) بتسخين المزيج، ثم يُبرَّد المحلول، وهذا يسمح للمُشرّعين بالالتصاق بالأجزاء المناسبة من خيط الدنا ـ تتدافع جزيئات المُشرِّعَيْن حتّى تعثر على مُتَمِّماتها بدقة، وترتبط بها ـ تتصرف كحدود لمنطقة الجزيء الذي يُراد انتساخه. أخيراً، تُرفع درجة الحرارة ثانية إلى المستوى الذي يمكِّن البوليميراز من أداء وظيفته بفعَّالية، وينمو خيط مُتتامٌ على المرصاف. ولأنه يتعين على الأنزيم أن يتحمَّل درجة الحرارة العالية لطور الصَّهْر، فإنه يُستخلص من جرثومة الحَرُوريَّة المائيَّة *thermus aquaticus* التي تعيش في الينابيع الحارَّة. تستغرق الدورة الكاملة قرابة ثلاث دقائق. وتُعاد الدورة مراراً وتكراراً نحو ثلاثين إلى أربعين مرَّة، وهذا يولّد عشرات ملايين النُسَخ من شريط الدنا الأصلي الممتّد بين واصِمَتيْ المشرِّعين (الشكل 2–16). وهذا يعني أن المنطقة المستهدفة حتَّى ولو كانت عيِّنة ميكروسكوبية من الدنا يمكن تكبيرها وتحضيرها للفحص.

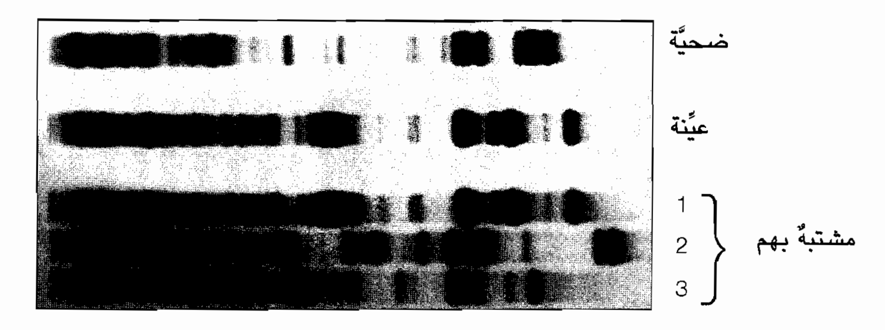
وتستفيد تقنية تحديد مواصفات الدنا بحدّ ذاتها من تعدّد أشْكَال polymorphism جيناتنا، أي كون جزيئات الدنا تتميَّز بفروق مهمَّة بين الأفراد. وعلى سبيل المثال، قد يحتوي رَمَمُ إنترونات الدنا الخاص بنا على سلاسل طويلة من هَذْرَمَة دنويَّة كانت قد تراكمت أثناء الانقسام المُنَصِّف. هنا سنركِّز على العدد المتغيِّر للمتكرِّرات الترادفيَّة variable number of tandem repeats (VNTR)، مثل الأعداد المتغيِّرة للسلسلة ...CGATCGATCGATCGAT... التي سبق أن تراكمت في المنطقة نفسها من دنا أفراد مختلفين. وبما أن هذه المتكرِّرات الترادفيَّة تقع في منطقة الإنترونات، فإنها لا تتجلّى بشيء ويبقى الفرد أو المتفرِّج غير مدرك لوجودها، خلافاً للتغيُّرات التي تحصل في الإكسونات، مثل تلك العائدة للعيون البنيَّة أو الزرقاء (والأخيرة هي نتيجة غياب الخضاب البنّي).



الشكل 2-16. تُبيِّن هذه السلسلة من الرسوم كيفية حدوث التفاعل التسلسلي للبوليميراز. في الأعلى إلى اليسار، نرى تمثيلاً من لولب مزدوج للدنا المستهدف. في الخطوة الأولى (إلى أسفل اليسار)، ينفصل الخيطان ويرتبط كلُّ مُشَرِّع بخيط. بعد ذلك تقوم أنزيمات بتنمية خيطين مُتَتامَّيْن على مرصاف من كلِّ خيط أصلي. يندمج الخيطان المزدوجان ثانية، ويرتبط المشرِّعان بكل واحد منهما. تقوم الأنزيمات الآن ببناء نسخة متتامَّة للخيطين، كما حصل من قبل، لكن الآن مع ظهور نُسَخٍ طبق الأصل للدنا الممتدّ بين المُشرِّعَيْن في المزيج، أي المتتالية الهدف، وذلك بعد عدد من الدورات.

لنفترض الآن أننا استخدمنا تقنية التفاعل المتسلسل للبوليميراز لتضخيم جزءٍ من جزيء دنا يتميَّز بتعدّدية شكلية عالية جداً بين الأفراد. يقوم أنزيم الاقتطاع، مثل AluI، بالتدافع حتى يعثر على المتتالية AGCT ويتعلق بها. بعد ذلك يقوم بقصّ الجزيء، أو EcoRI، الذي يرتبط بـ GAATTC عندما يتعثَّر بها، ومن ثمّ يقصها عند هذه النقطة، ويقطع مناطق الدنا المكبَّرة إلى شُدَف مختلفة الأحجام يتوقف عددها على أعداد المتكرِّرات الترادفيَّة في الفرد. بعد ذلك تُسحب

العيِّنة عبر هلام عن طريق تطبيق تيار كهربائي، وهي عملية تُسمَّى الرَّحَلان الكهربائي electrophresis. ولأن الشُدَف البالغة الصغر يمكنها أن تشق طريقها بسهولة أكبر من الشُدَف الكبيرة في غابة من الارتباطات المتصالبة في الهلام، تنفصل العيِّنة إلى مجموعة من الشرائط تشبه إلى حد ما الكود القضيبي (الشكل 2–17). ويعد نمط الشرائط وصفاً تصويرياً لطيف المتكرِّرات الترادفيَّة في العيِّنة، لذا فهو صفة أساسية للفرد.



الشكل 2-17. بصمات دنا عائدة لضحيَّة، وعيِّنة من مسرح الجريمة، وثلاثة أشخاص مشتبه بهم. تشير مواصفات الدنا بوضوح إلى أن المشتبه رقم 1 هو الشخص الجاني.

بهذه الطريقة، أو استحداثاتها المطوّرة، قُبِض على كثير من المغتصبين، وبُرِّئ الكثيرون، وجرى التعرُّف إلى قياصرة روسيا، وكشف أناستازيا المزيَّفة، وتحديد العلاقات التطوّرية، والقبض على اللصوص من شعرة واحدة، وإعادة لمّ شمل الأطفال مع عائلاتهم (كما حصل في الأرجنتين، عندما جرى تفريق العائلات عن بعضها بعضاً بطريقة غير إنسانية)، وإيجاد الأباء المتنكِّرين لأبوّتهم رغم ادّعائهم عكس ذلك. وقد كان لبعض التقدّم في علم الجزيئات الحيوية - كتطوير صناعة البنسلين وحبوب منع الحمل - تأثير مباشر على المجتمع.

كان أحد أكثر المشاريع طموحاً في القرن العشرين تحديد جميع متتاليات النوكليوتيدات في الجينوم (المجين) البشري. المهمَّة، بالطبع، مستحيلة، لأن كلَّ من عاش على هذه الأرض يمتلك جينوماً مختلفاً عن غيره (باستثناء التوائم المتطابقة). ومع ذلك، فالاختلافات في تركيب الإكسونات ثابتة نوعاً ما، و«الجينوم

النمطي» هو مفهوم معقول: ثمة قاعدة واحدة فقط من بين ألف تكون مختلفة بين الأفراد، لذا يختلف الأفراد بنحو 3 ملايين حرف، كثير منها قليل الأهمية. ربّما، سيكون كل واحد منا يوماً ما قادراً على استنساخ جينومه الخاص وأخذه إلى طبيبه (وربّما إلى شركات التأمين)، وتحديد جينوم الطفل عند الولادة: وتسجيل هذه المعلومات على قرص رقمي DVD والاحتفاظ بها مدى الحياة.

إن جسامة المهمّة يمكن تقديرها عن طريق التفكير بمدى حجم الجينوم البشري. فهناك زهاء 3 مليارات قاعدة نوكليوتيدية في جينومك. وإذا افترضنا أن هذا الكتاب يحتوي على نحو مليون حرف، فإن جينومك يعادل مكتبة تضم في أرجائها قرابة 3000 مجلّد. لنفترض أنك تعتبر نفسك عالِم كيمياء ماهراً فعلاً، قادراً على تحديد ترتيب القواعد بمعدّل قاعدة واحدة كل ساعة بواسطة إجراء سلسلة من التفاعلات، وتحديد هويّة النواتج باستخدام أساليب مخبريّة تقليدية. ستحتاج إلى ثلاثة مليارات ساعة، أي ما يعادل 34000 سنة عمل. ولكي تنجز ما تصبو إليه في عقد من الزمن بدل ذلك الوقت المثير للسخرية، عليك أن تعمل أسرع بنحو 3400 مرّة، وأن ترتّب تسلسل الدنا بمعدل قاعدة واحدة في الثانية، على مدى أربع عشرين ساعة في اليوم وسبعة أيام في الأسبوع. ولكي تتحقّق من صحّة التسلسل، عليك أن تكرر عملك عدة مرّات. عشر مرات مثلاً، يمكن أن تجعلك واثقاً من متتاليتك، وهذا يعني ترتيب المتتاليات بسرعة عشر قواعد في الثانية.

لكن ما يبعث على الدهشة أن كل ذلك قد تحقّق بالفعل. فعلى غرار الخطوتين المحوريّتَيْن السابقتين في علم الوراثة، وهما التكميم الأوّلي للوراثة الذي قام به مندل، ونموذج واطسون ـ كريك للدنا، كان مشروع الجينوم البشري حافلاً بالنزاعات على الأولويّة والملكية. والمجال هنا غير مناسب للدخول في تفاصيل حروب الجينوم، التي تركّزت، بوجه خاص، على أخلاقية الاحتفاظ بمعلومات عن الجينوم البشري بغية الحصول على منافع شخصية، لأن هذا الجينوم كان ينعم بتأييد كامل من مناصرين ذوي شأن، أمثال كريغ فنتر Craig Venter (المولود عام 1946) وجون سولستون John Sulston (المولود عام

1942)، دون أن نغفل شخصيات أخرى مثل فرانك كولينز Frank Collins وإريك لاندر Eric Lander. لقد شوّه النزاع لحظات رائعة في تاريخ الإنسانية كان ينبغي أن تمثِّل ذروة الإنجازات؛ لكن الحياة، جينومها بوجه خاص، هي كذلك. وخلال بضع سنوات، نسيت الأحقاد والعداوات تماماً كما نُسيت الحرب الفرنسية البروسية، لكننا سنظلّ نتذكر الإنجاز حتّى ولو لم نتذكّر الوسائل.

أما الإجراء المهم فكان تحديد تسلسل كلِّ قاعدة نوكليوتيدية في كلِّ خيط من خيطي الدنا في كلِّ صبغي. وقد استند هذا الإجراء إلى العمل الذي قام به فريدريك سانجر وفيه وجَّه انتباهه، بعد النجاح الذي حقّقه في تحديد سلاسل بروتين، نحو الدنا واستطاع أن يحدد عام 1977 أنساق جميع القواعد الموجودة في الفيروس fX174 وعددها 5375. وقد جاء إجراؤه على الوجه التالي: في البداية قام سانجر بتخليق خيط جديد للدنا مُتمِّم لمرصاف وحيد الخيط بحيث يحمل الحرف الأخير واسمة مشعَّة (جزيء استبدلت فيه ذرة بنظيرها المشعّ). وللقيام بذلك، فقد أدخل في المزيج الاعتيادي للأنزيمات والنوكليوتيدات نسخة محوَّرة من نوكليوتيد يُدعى ثنائي نوكليوتيد منقوص الأكسجين. وعندما تم دمج هذا النوكليوتيد المحوَّر توقَّف التناسخ ونتج عنه شريط دنا ينتهي بتلك القاعدة. بعد ذلك كرَّر الإجراء باستخدام ثنائي النوكليوتيد المنقوص الأكسجين للأحرف الثلاثة الأخرى من الألفباء. ولأن الخيطين ينتهيان عند نقاط مختلفة على جزيء المرصاف، فقد أنتجت كل عملية جزيء دنا بطول مختلف. وعندما سُحب المزيج عبر الطبقة السفلية المتشابكة من الجزيئات مشكِّلاً الهُلام، انتشرت الجزيئات المختلفة الطول، وظهرت بقعاً مختلفة على فيلم الأشعة السينية. والمعروف أن التحوير الذي يُستخدم في آلات تحديد السلاسل الأوتوماتية يقتضي استخدام واسمات تشعّ بألوان مختلفة عندما تُضاء بضوء الليزر، بحيث يظهر الحرف A باللون الأحمر، والحرف C باللون الأخضر، وهلمّ جرا. ومن ثمّ يمكن تحديد التسلسل بطريقة إلكترونية.

المكوّن الرئيسي الثاني هو تطبيق هذا الإجراء بناء على خط إنتاج قادر على تحديد آلاف القواعد في الساعة الواحدة. وهناك طريقتان رئيسيتان لذلك.

تنصّ الأولى على العمل في السلسلة بواسطة شرائط معروفة للدنا. أما الثانية، وتسمَّى "طريقة البندقيَّة"، فتقضي بتحطيم الدنا إلى عدد كبير من القطع، ومن ثَم تحديد تسلسل هذا الخليط المشوَّش. ويكمن التحدّي في الطريقة الثانية في إعادة تجميع سلسلة الدنا إنطلاقاً من هذه الشُدف الصغيرة. وهنا تؤدي أجهزة الكمبيوتر الفائقة دوراً مركزياً في عملية إعادة التجميع. وعلى وجه العموم، تعتبر طريقة التسلسل المنهجي أكثر دقَّة، لكن طريقة البندقية أسرع. وعملياً، تستعين كل طريقة بالطريقة بالأخرى.

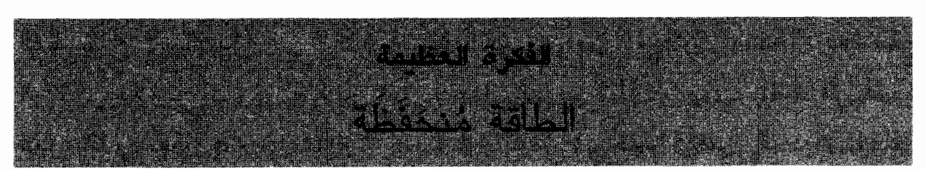
كانت أول مسوَّدة للجينوم البشري قد أُطلقت عام 2001، بعد زهاء خمسين سنة على تحديد بنية الدنا وبعد قرابة 100 سنة على الإقرار بعمل مندل وانطلاقة علم الوراثة. ونتائج معرفة الجينوم البشري عظيمة جداً ولا تُقدَّر بثمن، سواء كانت مفيدة للجنس البشري أو وبالاً عليه. ومثل جميع فروع العلوم العظيمة، فإن للمعرفة القدرة على إرضاء الشياطين والملائكة. لكنْ على الأقل، يمكننا اليوم لصق وصفتنا على المرْكَبَةِ الفضائية التي سوف نرسلها إلى الفضاء الخارجي البعيد، فقد تُتاح هناك فرصة عابرة لإعادة إحياء الإنسان برغم فقدان جميع التظاهرات المادية. وبأحسن الأحوال يمكننا، على كوكب الأرض، معرفة صلة القُربى وعدم هدر آمالنا في مماحكات ومشاحنات تافهة تنبع من اختلاف بضعة أحرف في جيناتنا.



الفصل 3

الطَّاقَةُ

عَوْلَمَةُ المُحَاسَبَةِ



الطاقة بهجة أبدية
وِليَام بْلايكْ

من غير الممكنِ للمحيطِ الحيويِّ النابضِ الذي انبثق من أرضنا اللاعضوية، ولا للنشاطِ الجزيئيِّ الذي يستديمُ هذا المحيطَ وينشره الآن، أن يفعلا ذلك دون دَفْقٍ influx من الطاقة الواردة من الشمس. لكنْ، ما هو هذا الشيء الذي يُسمّى طاقةً؟ قد تخرجُ هذه الكلمةُ من فم أيِّ شخصٍ، وربّما يراها العالِمُ شيئاً يحوِّلُ العالَمَ إلى كُلٍّ حيٍّ وقابلٍ للفهمِ؛ لكنْ ما هو هذا الشيء حقًّا؟

لقد أدرك الشعراء، بأسلوبهم الفذّ، مفهومَ الطاقة قبْلَ أن تدخُلَ في دائرةِ اهتمامِ العلماءِ بوقتٍ طويلٍ. وهكذا، فقد قام السير فيليب سيدني P. Sidney عام 1581، في مقالةٍ له بعنوان الدفاع عن الشعر The Defence of Poesie، بجذبِ الانتباهِ إلى «فعاليّةِ طاقةِ (Energie كما يسميها اليونانيون) الكاتِبِ. وكان يدورُ في خَلدِهِ قوةَ التعبير، بدلاً من قوّةِ رصاصةِ البندقيّةِ التي قتلتْهُ في وقتٍ لاحقٍ. وقد أَطْلَقَ عليها اليونانيون اسمَ *ἐνέργεια*، وهي كلمة ترجمتُها الحرفيّةُ «قيد العمل» in work. وفي وقتنا هذا، أدركتِ الجماهيرُ منزلَةَ الطّاقةِ، وأقنعت نفسها أنها تفهم معناها تماماً، ووجدتْ أنها غالية الثمن، وشعرتْ بدورها الجوهريِّ في العالَمِ الحديثِ، وأصابها الرّعبُ من احتمال عدم توفّرها.

مازالت الطاقة مجالاً لمناظراتٍ أدبيّةٍ، لكنها اتخذتْ مركزاً حيويًّا جديداً وغنيًّا في العِلْم. لم يكن الأمر كذلك دوماً. هذا ويعود الاستعمال العلميُّ لهذا المصطلح إلى عام 1807، عندما قام توماس يونغ T. Young (1773-1829) ـ الذي كان أستاذاً في الفلسفة الطبيعيّة في المعهد الملكيّ البريطانيّ، وأسهم في وقتٍ لاحقٍ في حلِّ شِفْرةِ deciphering حجرٍ رشيد ـ بالاستيلاء على هذا المصطلح لاستعماله في العلْمِ عندما كتبَ أنّ «من الممكنِ استعمالَ مصطلحِ الطاقةِ، بملاءمةٍ كبيرةٍ، للتعبير عن حاصل ضرب كتلةٍ أو وزنِ جسمٍ في مربّعِ العددِ الذي يعبّرُ عنه سرعتِهِ»[1]. وسنحاول فيما يلي فهمَ التّعليل الحديثِ للطاقةِ، ورؤيةَ الأهميّةِ الكبرى لحفظها.

●

لفهم طبيعةِ الطّاقةِ، علينا فهم سِمَتَيْنِ في غايةِ الأهميّةِ تتعلّقان بأحداث العالَم والعملياتِ التي تجري فيه. أحدُهما يُعْنَى بالسّماتِ المميِّزةِ لحركة الأجسام في الفضاء؛ والآخرُ يُعْنَى بطبيعة الحرارة. إن وصف الحركة في الفضاء تمَّتْ جوهريًّا بحلول نهاية القرن السابع عشر. وقد تطلّب الفهمُ الكاملُ لطبيعةِ الحرارةِ بذلَ جهودٍ مضنيةٍ ووقتاً طويلاً بدرجةٍ مذهلةٍ. ولم يكتمل هذا الإنجاز إلاّ بحلول منتصف القرن التاسع عشر. وما إنْ تمّ فهمُ الحركةِ والحرارةِ، حتى برع العلماء في فهم طبيعة الأشياء، أو أنهم ظنُّوا أنهم برعوا فعلاً، في ذلك الوقت.

وقد تطرّق اليونان، لكنْ دونَ فائدةٍ تُذكَرُ، إلى حركة الأجسام، وأربكوا العالَمَ طوال ألفيْ سنةٍ: إذْ كانت بحوثهم في جوهرها ذاتَ طابَعٍ رياضيٍّ وجماليٍّ أكثرَ من كونها فيزيائيةً. وهكذا، توقّع أرسطوطاليس (384-322 ق.م.) أن يظلّ سهمٌ طائراً بفعل الدّوّامات الهوائية الموجودة خلفه، وتوصّل إلى أن السّهمَ يجب أن يتوقّفَ عن الحركة بسرعةٍ في الخلاء. وكما يحدث غالباً، فالعلْمُ يثبت صحة

(1) بعد أن كان أستاذاً في الفلسفة الطبيعية (1801-1803) في المعهد الملكيّ البريطانيّ بلندن، نُشِرَتْ محاضراته التي ألقاها في المعهد عام 1807 في كتاب عنوانه: A course of lectures on natural philosophy and the mechanical arts.

دعوى بافتراض من خطئها، ويتوصل بعد ذلك إلى تناقض: فالسّهم يتباطأ بفعل مقاومة الهواء، ولا يُدْفَع إلى الأمام بهذه المقاومة. كانت الأدلّةُ في تلك الأزمنةِ على ضرورةِ وجودِ قوةٍ تستديم الحركةَ وافراً، لأن الثيران كانت بحاجةٍ إلى إجهاد لإبقاء العربات الخشبية التي تجرّها في حالةِ حركةٍ: كان من السّخف الشديد التفكيرُ بأسلوبٍ آخر، لأنّ هذا التفكيرَ يقتضي أن يربط المزارعون الثيران خلف العربة المتحركة كي تواصلَ حركتها الطبيعية! هذا وكانت الأسهمُ والحجارةُ المتطايرةُ تتّسم بإشكاليّاتٍ أكبر، لعدمِ مشاركة ثيرانٍ واضحة في حركاتها. وقد رأى أرسطو، ذو العقلِ اللمَّاحِ، في دوّاماتِ الهواءِ حافزاً لتقدّم السّهمِ إلى الأمام، وهذا أنقذ نظريته.

كانت لدى أرسطو، أيضاً، أوهامٌ تتعلّق بمسبِّبات الأحداث، وبحركة الأجسام[2]. كانت أوهامُهُ، إلى حدٍّ ما، معقولةً تماماً، وكان يدهشه البحثُ الذي لا يتوقّف عن تفسيراتٍ لها، وعن حثّ الطبيعة على تقديم الأجوبة المناسبة. بيد أنه، إضافةً إلى كون آرائه خاطئةً تماماً، فإنها كانت تفتقر إلى ما نعتبره الآن قوةً إيضاحيّةً، كما كانت عاجزةً كلّيًّا عن تقديم أجوبةٍ كمّيّةٍ. فقد درس، على سبيل المثال، سلسلةً من الكراتِ التي لها نفس المركز ـ كانت الكرةُ الأرضيةُ داخلَهَا ـ ومحاطةً على التوالي بكرةِ ماءٍ، وكرةِ هواءٍ، وكرةِ نارٍ، وكلُّ هذه الكراتِ موجودةٌ ضمن كراتٍ بلّوريّةٍ سماويّةٍ. وفي هذا النموذج، كانت المادّةُ تبحث عن موقعِهَا الطبيعيِّ، لذا سقطتِ الأجسامُ الأرضيةُ باتجاه الأرضِ بعد أن قُذِفَتْ بقوةٍ إلى الأعلى في البداية، وانطلقتْ اللُّهُبُ الناريةُ نحو الأعلى، باحثةً عن مقرّها الطبيعيِّ. من السهل إيجاد ثغرات في هذا النموذج بناءً على وجهة نظرنا الحاليّةِ للأشياءِ، لكنّها سيطرتْ على عقولِ النّاسِ طوال ألفيْ سنة، وربما بسبب كونهم متمسّكين بالتعاليم الصادرةِ عن أصحابِ النّفوذِ العلميِّ في تلك الأوقات بدلاً من اعتمادهم على ملاحظاتهم الخاصة، أو ربما لافتقارهم إلى تشجيعهم وحثّهم على البحثِ والتحقيقِ، اللذيْنِ كانا ضموريّيْن لمواجهة أصحاب النفوذ بالملاحظات والأرصاد.

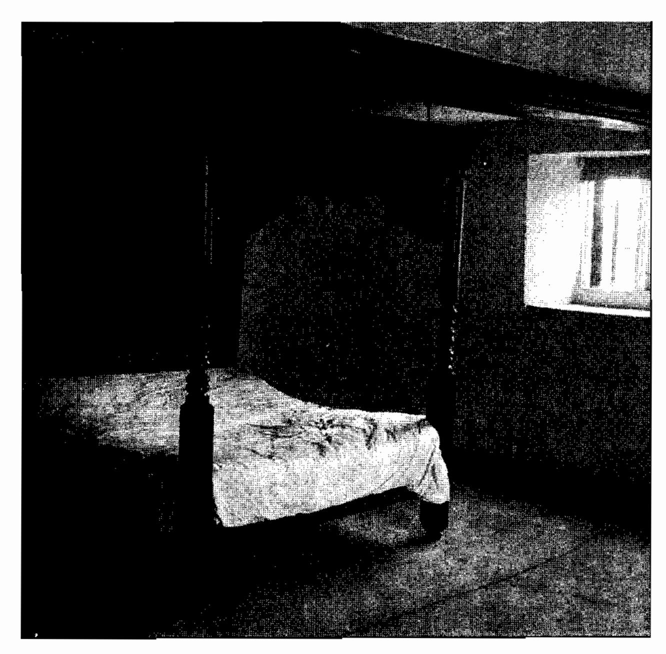
(2) لا شك في أن قرّاء هذا الكتاب، بعد ألفي سنة تقريباً، سيجدون أن لدينا أوهاماً مشابهة، لكنها، على الأقل، أضعفُ من أوهام أرسطو.

كان الإسهامُ الرئيسيُّ لغاليليو في هذا الموضوعِ الخاصِّ إزالةَ العصابةِ التي وضعها أصحابُ النظرياتِ القديمةِ على عيونِ النّاس، ومع الحفاظ على عينيه مفتوحتين على الملاحظة، فقد برهن تجريبيًّا على أن نظرية أرسطوطاليس كانت خاطئة. لقد أثبت غاليليو أنّ الجسمَ يظلّ في حالةِ حركةٍ دون وجود قوةٍ تؤثر فيه، وتوصّل إلى هذا الاستنتاج بدراسةِ حركةِ كرةٍ تتدحرج إلى الأسفل على مستوٍ مائل، ثم إلى الأعلى على مستوٍ مماثل، ولاحظ أنه أياً كانت زاوية ميل المستوى الثاني، فإن الكرة تبلغ نفس الارتفاع. استخلص من ذلك أنه إذا جعل المستوى الثاني أفقيًّا، فإن الكرةَ تظلّ تتدحرج إلى الأبد، لأنها لنْ تبلغَ البتّةَ ارتفاعَهَا الأوَّليَّ. إنّ استعمالَ مستوٍ مائلٍ، كان في حدّ ذاته فكرةً عبقريّةً لأنها أبطأت عملياتِ - سقوطِ الأجسامِ - إلى الدرجة التي تجعل بالإمكان دراستَها كمِّيًّا وبدقّةٍ، وقد مهّد هذا الانطباعُ الطريقَ للملاحظةِ.

كانت النتيجةُ التي توصّل إليها غاليليو نقطةَ انعطافٍ كبرى في العلْم، لأنها أكّدَتْ قوةَ التجريد abstraction والاستمثال idealization في العلم اللذين ذكرتهما في المقدّمةِ، علماً بأن الاستمثالَ هو استبعادُ العوامل الدخيلة التي تحجب أساسياتِ تجربةٍ ما. وبالطبع، فلم يبرهنْ غاليليو على نحوٍ واضحٍ explicitly أن الكرةَ ستواصلُ تدحرجَها إلى الأبدِ، وفي أيِّ تجربةٍ من هذا النوع، فإنّ كرةً حقيقيةً ستتوقّف عن الحركةِ عاجلاً أم آجلاً بطريقةٍ أرسطويَّةٍ تبدو حتميّةً. بَيْدَ أنّ غاليليو أدرك أنّ ثمّةَ مُرَكّباتٍ أساسيةً للسلوكِ من جهةٍ، وللتأثيراتِ الخارجيةِ من جهةٍ أخرى. وتضمّ هذه التأثيراتُ مقاومةَ الهواء والاحتكاكَ: فإذا أضعفناها (بواسطة صَقْلِ الكرةِ وسطحي المستويَيْن، مثلاً)، فإنه يحدث اقتراب شديدٌ من المثاليّةِ، ومن السلوكِ الأساسيِّ للكرة. وفي خبرة أرسطوطاليس التي كوّنها عن العالَم، كانت التأثيراتُ الخارجيّةُ في حركةِ العربةِ التي تجرّها الثيرانُ مسيطرةً سيطرةً تامةً على سلوك العربة.

انتقل مِشْعَلُ غاليليو إلى نيوتن. ووفقاً للتقويم القديم، وُلِدَ إسحاق نيوتن (1642-1727)[3] في العام الذي تُوُفِّيَ فيه غاليليو (الشكل 3-1)، وإذا أردنا

(3) يمكنك الحصول على المعلومات المفصّلة عن نيوتن من الموقع:
http//www.newton.cam.ac.uk/newton.html



الشكل 3-1. وُلِدَ نيوتن والفيزياءُ الحديثةُ في هذه الغرفة في صباح عيد الميلاد عام 1642. الأثاث ليس أصليًّا.

التعبيرَ عن هذيْن الحدثيْن رومنسِيًّا، قُلْنَا إنهما انتقالُ روحٍ من شخصٍ إلى آخرَ. وخلافاً لغاليليو، كان نيوتن، بكل المقاييس، شخصاً فظًّا سيِّىءَ الطِّباع، لكنه واحدٌ من أعظمِ العلماءِ قاطبةً. ودون أن يساعده أحدٌ تقريباً، فقد وظَّف الرياضيّاتِ في الفيزياء، وبذلك يكونُ قد فتح الطريق إلى علم الفيزياء الكمِّيِّ الحديثِ. وفي الحقيقة، فقد فعل أكثرَ من ذلك، إذ إنه ابتكر الرياضيّاتِ التي كان بحاجةٍ إليها لمتابعة برنامجه. وكتابُهُ المبادىء Principia[4]، الذي نُشِرَ عام 1687، تمثالٌ لقوّةِ الفكرِ البشريِّ في عَقْلَنَةِ rationalization الملاحظة.

إن مسلّمات axioms إقليدس الخمس التي يُبنَى عليها علم الهندسة، والتي سندرسها في الفصل 9، تلخّصُ بنيةَ الفضاءِ، ومن ثَمَّ فإننا نَعْرِفُ بواسطتها موقعنا في العالَمِ. أما قوانينُ نيوتن الثلاثةُ فتُلَخِّصُ الحركةَ في الفضاء، ومن ثَمَّ

(4) الاسم الكامل هو: Philosophiae naturalis principia mathematica، أو الأسس الرياضية للفلسفة الطبيعية Mathematical principles of natural philosophy.

فإننا نَعْرِفُ بواسطتها إلى أين نحن ذاهبون. وإذا أردنا تقديمها بصيغةٍ مبسَّطةٍ قليلاً، فيمكن صوغها كما يلي:

1. يستمر الجسم في حالةِ حركةٍ منتظَمةٍ على خطٍّ مستقيمٍ، ما لم يَخْضَعْ لقوّةٍ.

2. يتناسبُ تسارعُ الجسمِ مع القوةِ المسلّطة عليه.

3. لكلِّ فعلٍ ردٌّ فعلٍ يساويه في الشدّة، ويعاكسه في الاتجاه.

وعلى هذه الدعاوى البسيطة الثلاث بُنيَ الصرحُ الضخم للميكانيك الكلاسيكي (التقليدي)، الذي يقدّم وصفاً للحركة المبنيّة على قوانين نيوتن، ويتنبأ بحركةِ الجُسيماتِ، والكراتِ، والكواكبِ، وفي هذه الأيام، السواتلِ (الأقمار الاصطناعية) satellites والسفنِ الفضائيّةِ.

القانون الأول لنيوتن ليس سوى إعادةِ توكيدٍ لملاحظة غاليليو المضادة لمذهب أرسطو، ويسمَّى، أحياناً، قانون العطالة law of inertia. أما قانونه الثاني، فيُعْتَبَرُ، عموماً، أغنى قوانينَه الثلاثة، لأنه يسمح لنا بحساب مسارٍ جسيمٍ خلال منطقةٍ توجَدُ فيها قوىً مؤثرةٌ في الجسيم. وعندما تدفَع قوةٌ من الخلف، فإننا نسير بسرعةٍ أعلى بنفس الاتجاه؛ وعندما تدفعُ من الأمام، فإن حركتنا تتباطأُ. وإذا أدفعتْ قوةٌ جسيماً من جانبه، فإننا ننحرف بالاتجاه الذي تدفعنا القوةُ فيه. وهذا القانون يُكتَبُ بالصيغة:

القوة = الكتلة × التسارع

حيث الكتلة (وعلى نحوٍ أكثر تحديداً الكتلة العطاليّة inertial mass) هي قياسٌ لاستجابة الجسيم للقوةِ. وإذا كان لدينا قوةٌ معطاةٌ، فإنّ التّسارعَ يكون كبيراً عندما تكون الكتلةُ صغيرةً، لكن التسارع يكون صغيراً عندما تكون الكتلة كبيرةً. وبعبارةٍ أخرى، تشير الكتلةُ العطاليَّة الكبيرةُ إلى قابليّةٍ استجابةٍ ضعيفةٍ، والعكس بالعكس. وتستكشف العينُ البصيرةُ في هذا القانون تكراراً للمعنى، لأنه يحدّد الكتلةَ بدلالة القوةِ، والقوةَ بدلالةِ الكتلةِ.

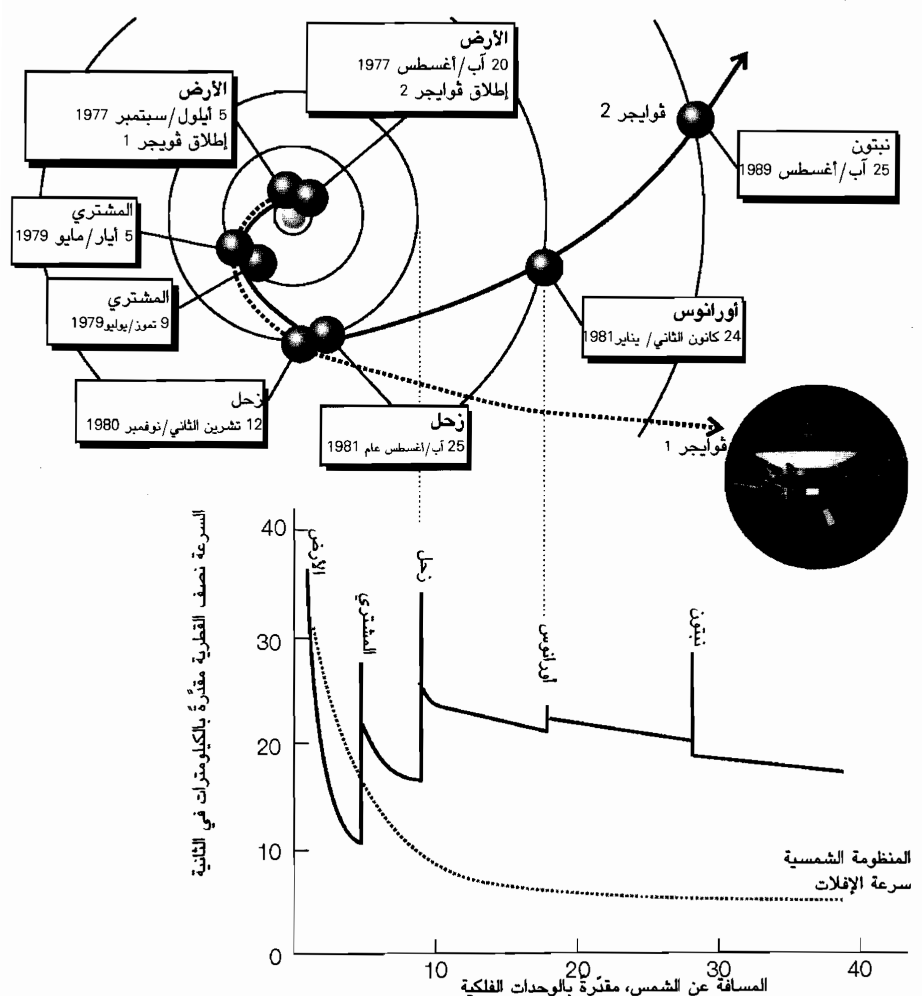
ولما كان التسارعُ هو المعدّلَ الذي تتغير به السرعة، فمن المحتمل أن تحبِّذَ وجودَ طريقةٍ «مدفونةٍ» في قانونِ نيوتن الثاني، هدفها التنبؤ بمسار جسيمٍ

خاضعٍ لقوة معطاة يمكن أن تتغيّر من مكانٍ إلى آخر وتأخذ قيماً مختلفةً في أوقاتٍ مختلفةٍ. وكلمةُ «مدفوفةٍ» السابقةُ مصطلحٌ جيّد في هذا السياق، لأن حساب المساراتِ يمكن أن يكون تمريناً صعباً جدًّا، وهو أقربُ إلى إخراج جثّةٍ من القبر منه إلى الجبر. ومع ذلك، فمن الممكن إجراؤه في عددٍ من الحالات البسيطة، بل وفي حقولٍ معقَّدةٍ للقوةِ، كتلك الموجودة قرب النجوم المزدوجة، أو حتى حول شمسنا حين نُدْخِلُ في اعتبارنا التفاعلاتِ بين الكواكب، وذلك باستعمال الحواسيب (الشكل 3-2). واختصاراً، يمكننا إيرادُ تفسيرٍ للقانون الثاني على أنه يعني أنه إذا عَرَفْنَا مكانَ جسيمٍ ـ أو حتّى مجموعة من الجسيمات ـ في زمن معطىً، فبإمكاننا، من وجهة المبدأ التنبؤ بمكان وجوده، وإلى أين هو ذاهب، في أي وقت لاحق. وكان التنبؤ بالمسارات الدقيقة واحداً من أمجاد الميكانيك الكلاسيكي.

قانون نيوتن الثالث أعمق من مظهره. وللوهلة الأولى، يبدو أنه يقتضي أنه إذا صدم مِضْرَبٌ كرةً، فإن القوةَ التي تعرضت لها الكرة يقابلها قوةٌ مساويةٌ في الشدّةِ ومعاكسةٌ في الاتجاه تؤثر بها الكرةُ في المضربِ. ويمكننا، في الحقيقة، الشعورُ بالقوةِ التي تتعرضُ لها الكرةُ عندما نصدمها بمضربٍ أو نركلُها بقدمنا، لكنّ الأهميةَ الحقيقيةَ للقانونِ الثالثِ تتجلّى في أنه يستلزم قانونَ «انْحِفَاظٍ» conservation law. الانحفاظُ هو موضوع هذا الفصل، بَيْدَ أنه يتعيّن علينا تعرّف المفاهيمِ الواردةِ فيه.

قانون الانحفاظ هو دعوى تقول إن شيئاً ما لا يتغير. قد يبدو أن هذا أكثرُ نمطٍ مزعجٍ من التعليقاتِ التي يمكن ورودها في العلم. وفي الحقيقة، فهو، عموماً، أهمُّ نمطٍ للقوانينِ العلميّةِ، لأنه يوفر لنا نظرةً عميقةً في تناظر symetry ـ وبوجهٍ أساسيٍّ، شكلِ ـ النُّظُمِ، وحتى في تناظراتِ المكانِ والزّمانِ. وقانونُ الانحفاظِ الخاصُّ الذي يقتضيه قانونُ نيوتن الثالثُ هو انحفاظُ الاندفاعِ (كميةِ الحركةِ) الخطِّيّ conservation of linear momentum. وفي الميكانيك الكلاسيكيّ، فإن الاندفاعَ الخطّيّ لجسيمٍ هو، ببساطةٍ، جُدَاءُ (حاصلُ ضربِ) كتلته في سرعته:

الانفاعُ الخطِّيُّ = الكتلةُ × السرعة

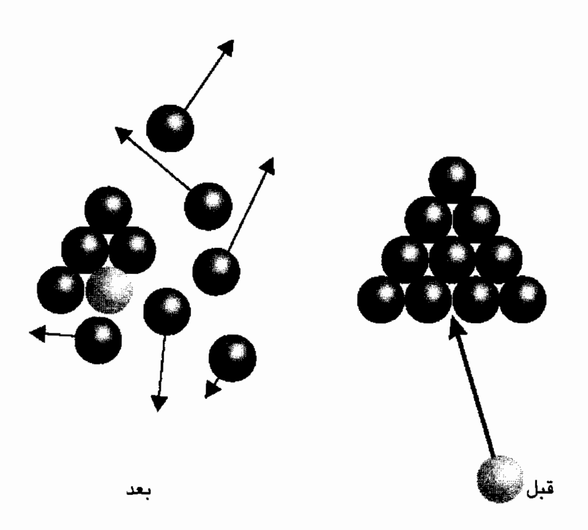


الشكل 3-2. تُحْسَبُ المساراتُ المداريّةُ لسفن الفضاء باستعمال الميكانيكِ النيوتُنِيِّ. الحسابات معقّدَة لأن السفنَ الفضائيّةَ معرّضةٌ لتاثيرات الكواكب. ويبيّن المخطَّطُ العلويُّ مساريْ السفينتيْن الفضائيتيْن ڤوايجر 1 وڤوايجر 2، اللتين بدأتا رحلتَهما عام 1977، وما زالتا تعملان منذ ذلك الوقت. إن ڤوايجر 1، وهي الآن أبعد جسمٍ صنعه الإنسانُ في الكون، ستغادرُ المنظومَةَ الشمسيَّةَ بسرعةٍ تُقَدَّر بنحو 3.6 واحدةٍ فلكيّةٍ في السنةِ (الواحدة الفلكية هي متوسط نصف قطر فلك الأرض حول الشمس، ويعادل قرابة 150 مليون كيلومتر)، وبزاوية مع مستوي مدار الكواكب قدرها 35 درجة. هذا وإن ڤوايجر 2 ستُفلت أيضاً من المنظومة الشمسية بسرعة قدرها زهاء 3.3 وحدة فلكية في السنة، وبزاوية مع مستوي مدار الكواكب قدرها 48 درجة. لكنْ بالاتجاه المعاكس. ويبيّن المخطَّط الأسفل التعزيزاتِ في سرعةِ السفينتيْن الفضائيتيْن الناتجةَ من دورانهما حول الكوكب. وقد ضمنت هذه التعزيزاتُ التي أحدثتْها الثقالةُ أنهما بلغتا سرعةً تكفي للوصول إلى أهدافهما، ومن ثم مغادرة المنظومة الشمسية.

يعني هذا التعريفُ أنه يوجد لقذيفةِ مِدْفَعٍ متحركةٍ بسرعةٍ اندفاعٌ عالٍ، لكنْ لكرةِ الطاولَةِ المتحركة ببطءٍ اندفاعٌ منخفضٌ. الاندفاعُ الخطّيّ هو دلالةٌ على قوة صدمِ الجسمِ المتحرّكِ عندما يصيبُ جسماً، لذا ثمة فرقٌ بين صدم قذيفةِ مدفعٍ وكرةِ الطاولة. وينصّ قانون انحفاظ الاندفاع الخطيّ على أنّ الاندفاعَ الخطيَّ الكلِّيَّ لمجموعةٍ من الجسيمات لا يتغيّرُ شريطة أن تكونَ غيرَ خاضعةٍ لقوةٍ خارجيةٍ مسلّطة عليها. وعلى سبيل المثال، فعندما تتصادم كرتا بلياردو، فإن اندفاعَهما الخطيَّ الكليَّ هو نَفْسُهُ قبلَ التصادم وبعدَه. وعلينا تحليل النصِّ الكامل «للاندفاع الخطي» قبل أن نتمكّن من استيعابه.

الاندفاعُ كمية موجَّهةٌ، بمعنى أنه يوجد لجسيميْن لهما نفس الكتلة، ويتحركان بنفس السرعة، لكنْ باتجاهيْن مختلفيْن، اندفاعان مختلفان. ولكرتي بلياردو تتدحرجان، كلٌّ منهما متوجهةٌ إلى الأخرى، بنفس السرعة، اندفاعان خطّيّان متساويان، لكنْ متعاكسان، واندفاعُهما الخطيّ الكليّ يساوي الصفر. وعندما تتصادمان بعد أن كانتا تتدحرجان على استقامةٍ واحدةٍ، فإنهما تنفصلان أحداهما عن الأخرى، ويكون اندفاعهما الكلي بعد الاصطدام صفراً أيضاً. ونرى في هذا المثال أنه برغم تغير اندفاع كلٍّ من الجسيميْن، فإنْ الاندفاعَ الخطيَّ الكلّيّ لا يتغير. وهذه النتيجة عامّةٌ تماماً: فأيًّا كانت الاندفاعاتُ الخطيّةُ الابتدائيّةُ لكلٍّ من الجسيمات، فإن مجموعَ هذه الاندفاعاتِ سيظلّ على حاله دون تغيُّرٍ قبل تفاعل الجسيمات وبعده (الشكل 3-3). البلياردو نفسُهُ لعبةٌ مبنيّةٌ، كلّيًّا تقريباً، على مبدأ انحفاظ الاندفاع الخطيّ: فكلّ تصادمٍ بين الكرات، أو بين الكراتِ وحافةِ الطاولةِ يخضع للقانون، ويؤدّي إلى مساراتٍ مختلفةٍ على الطاولة، وهذا يتوقف على زاويةِ اقتراب الكرةُ من كرةٍ أخرى أو من حافةِ الطاولةِ.

سنقوم الآن بقفزةٍ عملاقةٍ، لكنْ مُتَحَكَّمٍ فيها، من قاعة البلياردو إلى الكون. الشيءُ المثيرُ للاهتمام، هو أنه لمّا كان الاندفاعُ الخطيّ منحفظاً في أيِّ عمليّةٍ، فلا بُدَّ من وجود قدْر ثابتٍ من الاندفاع الخطّيّ في الكون. وهكذا، فعندما تسوق سيارتَك، فَعَلَى الرُّغمِ من زيادة اندفاعك مع تسارع حركتك، وتغييرِ اتجاه اندفاعك عندما تدور سيارتُكَ، فإن شيئاً ما في مكانٍ ما يأخذ الاندفاعَ بحيث لا يتغيّر



الشكل 3-3. الاصطداماتُ، والتفاعلاتُ عموماً تحفظ الاندفاع الخطيّ، وتكونُ النتيجةُ أنّ الاندفاعَ الخطيَّ الكّليَّ بعد التصادم هو نفسُ الاندفاعِ الخطّيِّ قبل التصادم. ونرى هنا تصادمَ كرةٍ مع مجموعة من الكرات. ويُشار إلى الاندفاع الخطّيّ للكرة التي يدفعها لاعبُ البلياردو بعصاهُ بطولِ واتجاهِ السّهمِ في اليسار. وينتقل الاندفاع الخطّيّ إلى ستٍّ من الكرات «الحمراء»، كما يشار إلى اندفاعاتها الفردية بأطوال واتجاهات الأسهم في اليمين. وإذا رتّبْتَ هذه الأسهم بحيث يكون رأس كل منها في بداية سابقة، فإنك ستحصل على السهم الذي بدايته بداية أول سهم، ورأسه رأس آخر سهم، وسيكون مساوياً للسهم الأصلي.

الاندفاعُ الكلّيّ في الكون. إنك في الواقع تدفعُ الأرضَ قليلاً بالاتجاهِ المعاكسِ خلال حركتِكَ: إنك تُسرِّعُ الأرضَ في مدارها إذا سُقْتَ السيارة باتجاهٍ واحدٍ، وتبطئُها إذا سُقْتَ بالاتجاه المعاكس. إن كتلةَ الأرض كبيرةٌ جدًّا مقارنةً بكتلة سيارتك، ومن ثَمَّ فإن أثرَهَا لا يمكن كشفُهُ مهما حرقْتَ من مطاط دواليب السيارة.

لقد سبق وقلتُ إن قانونَ الانحفاظ هو نتيجةٌ لتناظرِ شيءٍ ما. وهذا الشيءُ في هذه الحالة هو الفضاء نفسه، لذا فإن تناظر الفضاء مسؤولٌ في النهاية عن انحفاظ الاندفاعِ الخطّيِّ. تُرى، ما الذي يعنيه تناظر الفضاء، وشكل shape الفضاء؟ في هذه الحالة، كل ما يعنيه ذلك هو أن الفضاء ليس مكوّناً من تكتلاتٍ. وخلال تحرُّكِكَ في فضاءٍ خاوٍ على خطٍّ مستقيمٍ، يظلّ الفضاءُ على حاله

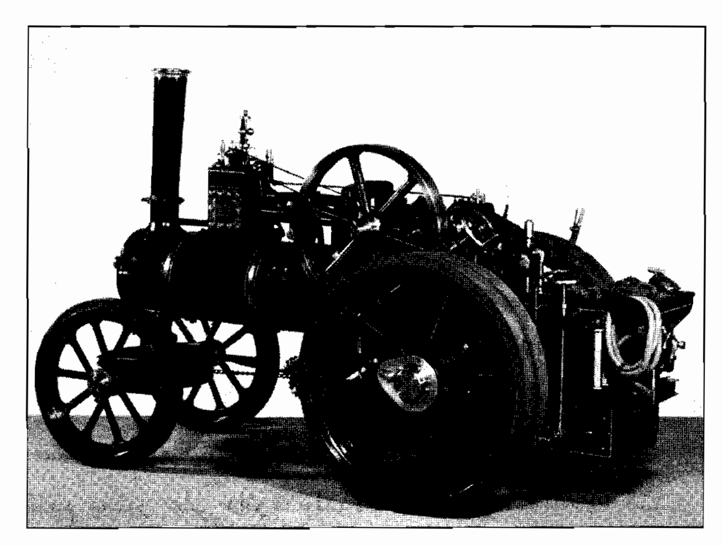
بالضّبط: فكلٌّ مكانٍ فيه سلِسٌ ولا متغيِّرٌ. إنّ انحفاظَ الطاقة هو علامةٌ على أن الفضاءَ ليس متكتِّلاً، وقانونُ نيوتن الثالثُ هو طريقةٌ «عاليةُ المستوى» لقول إن الفضاء هو كذلك.

●

ثمة نتيجةٌ أخرى لقانون نيوتن الثالثِ: قانونُ انحفاظٍ آخر، ونظرةٌ عميقةٌ أخرى في شكل الفضاء. لقد كنّا نتحدث عن الاندفاع الخطّيّ، وهو اندفاعُ جسيمٍ يسير على خطٍّ مستقيمٍ. ثَمَّةَ أيضاً خاصة الاندفاع الزَّاوِيِّ angular momentum، وهو اندفاعُ جسيمٍ يسير على دائرةٍ. ولدولاب الموازَنَةِ flywheel الثقيلُ الذي يدور بسرعةٍ اندفاعٌ زاويٌّ كبير جدًّا؛ أمّا الدّرّاجةُ الهوائيّةُ التي تدور ببطءٍ فلها اندفاع زاوي صغير.

من الممكن انتقالُ الاندفاعِ الزاويِّ من جسمٍ إلى آخر إذا كان الجسمُ الأوّل يمارسُ **عزم فَتلٍ** torque، أيْ قوَّةَ فتلٍ، على الجسم الثاني، ولم تكن استجابةُ الجسم الثاني لعزمِ الفتلِ متوقِّفَةً على كتلته، بل على كيفيّة توزّع مادّته. فمثلاً، إن تسريعَ دولاب في الحالة التي تكون كتلتُه مركَّزَةً في حافتِهِ أصعبُ من تسريعه في الحالة التي تكون فيها نفسُ الكتلةِ مركَّزَةً قرب محور axle الدّولاب. وهذا هو السبب في أنّ تركيزَ الفولاذ في دواليب الموازنة يكون قربَ حافتها (الشكل 3-4)، لأنّ ذلك التوزيعَ جيّدٌ في تخميد التغيّراتِ في السرعةِ الزاويَةِ: فالمعدن قربَ المحور أقلُّ فاعليَّةً.

الاندفاع الزاويّ يُحْفَظُ، شريطة أن يكون النظامُ غيرَ خاضعٍ لعزومِ فتلٍ خارجيّةٍ. لنفترضْ أنْ كُرَتَيْ بلياردو مُدوَّمَتَيْن تصطدمان بضربة عَرَضِيّةٍ؛ عندئذٍ قد ينتقل الاندفاعُ الزاويّ من كرةٍ إلى الأخرى، وَتَدْوِيمُ spin إحداهما قد ينتقل جزئيًّا إلى الأخرى. ومع ذلك، فإن مجموعَ الاندفاع الزاويّ بعد الاصطدام يظلُّ نفسَ ما كان عليه سابقاً: أي أنّ الاندفاع الزاويّ منحفظٌ. وهذا صحيح في الحالة العامة: أي أنّ الاندفاعَ الزاويَّ الكلِّيَّ لمجموعةٍ من الجسيمات المتفاعلة لا يُمكنُ



الشكل 3-4. يحتوي دولاب الموازنة على كمية كبيرة من المادة مركّزة على مسافة كبيرة من محوره. ويتطلب مثل هذا الدولاب عزمَ فتلٍ كبيراً لتغيير اندفاعه الزاويّ. وفي قاطرة الجر التي تدفعُ بالبخار، والتي تظهر في هذا الشكل، يساعد دولاب الموازنة (وهو أعلى الدواليب في الشكل) على الحفاظ على حركةٍ مستقرّة للكبّاس.

أنْ يُكَوَّنَ ولا أن يتلاشى. وحتى لو تباطأت حركةُ كرةِ البلياردو المدوَّمةِ بفعل الاحتكاك، فلنْ يضيعَ الاندفاعُ الزاويُّ: إذ إنه ينتقل إلى الأرض. ونتيجةً لذلك، تقوم الأرضُ بالتّدويمِ بسرعةٍ أعلى قليلاً (إذا كانت الكرةُ تدور أساساً بنفس اتجاه دورانِ الأرض)، أو بسرعةٍ أدنى قليلاً (إذا كانت الكرة تدور بالاتجاه المعاكس). وعندما تُدْخِلُ مسماراً مُلَوْلَباً screw في نصف الكرة الشماليّ، فإنك تزيدُ من سرعة دوران الأرض حول محورها، لكنَّكَ تُبطيءُ هذا الدورانَ ثانيةً حين تتوقف عن عملك؛ وعندما تفعلُ ذلك في نصف الكرة الأرضيّة الجنوبيِّ، فإنك تُبطيء السرعةِ ثم تزيدها حين تتوقّفُ. ويبدو أن للكون بمجمله اندفاعاً زاوياً صفريًّا، لعدم وجود دورانٍ للكون بمجمله. وسيظلّ كذلك دائماً، لأنه ليس بمقدورنا توليدُ اندفاعٍ زاويٍّ؛ وما يُمكنُنَا عملُهُ فقط هو نقلُهُ من منطقةٍ من الكونِ إلى أخرى.

تُرى، ما الذي يمكن لانحفاظ الاندفاع الزاويّ أن يخبرنا عن شكل الكون؟

لمّا كان الاندفاع الزاويّ يتعلّق بالحركة الدورانية، فبوسعنا التوقّعُ بأن انحفاظَهُ يخبرنا شيئاً عن شكل الفضاء. وفي الحقيقة، فإن انحفاظ الاندفاع الزاويّ يبيّن أننا سرنا على دائرةٍ حول نقطةٍ معيّنةٍ، فلن نقابل أيَّ تكتلاتٍ في الفضاء. إنّ انحفاظَ الاندفاع الخطّيّ ينبثق من التماثل uniformity في الفضاء عندما نسير على خطٍّ مستقيم؛ أما انحفاظ الاندفاع الزاويّ فينشأ من تماثل الفضاء عندما نسير بحركةٍ دائريّةٍ. وبعبارةٍ أكثرُ تقنيَّةً، فإن انحفاظَ الاندفاع الخطّيّ يخبرنا أن الفضاءَ الخالي متجانسٌ، وانحفاظَ الاندفاع الزاويِّ يخبرنا أنه مُتَنَاحٍ isotropic. وينبئنا قانونُ نيوتن الثالثُ ما نظنُّ أنه شيءٌ واضحٌ، وهو أنّ الفضاءَ متماثلٌ أينما ذهبنا (ما دمنا بعيدين عن القوى الخارجيّةِ وعزومِ الفتلِ). بَيْدَ أنّ حقيقة وجودِ نتائجَ مقيسةٍ (قابلة للقياس) measurable لهذا القانون تعني أن توقّعاتنا النظريَّة لطبيعة الفضاء تخضعُ للتحقّق التجريبيّ، وهذا شيء رائع.

●

ربّما لاحظتَ أن الطاقةَ لم تُؤَدِّ دوراً بعد فيما سردناه حتى الآن. لم يستعمل نيوتن هذا المصطلحَ، ومات قبل قرنٍ من اقتراح يونغ Young اعتمادَهُ. لقد كانت صياغتُهُ لعلم الميكانيك، مع كلِّ ما تميَّزتْ به من أصالةٍ وأناقةٍ، تَستعمِلُ مفهوماً مادِّيًّا للقوة. أنَا وأنتَ نظنُّ أننا نعرف تماماً ما هي القوة، لأننا نعرف متى نتعرّض للقوة أو نمارسها. واعتمادُها من قِبَلِ نيوتن بأنها السِّمةُ المركزيّةُ للميكانيك الذي أبدعه علامةٌ على أنّ الفيزياءَ لم تتركِ الحياةَ العمليَّةَ إلاّ قليلاً. وكما رأينا عند حديثنا عن غاليليو، فقد كان يرافقُ مسيرَةَ التّقدّمِ في العِلْمِ، عموماً، انتقالٌ من المحسوس إلى المجرّدِ، لأن التّمكُّنَ من الموضوع يصبِحُ عندئذٍ أشملَ. يُوجد عدد كبير من البذلات suits، لكنْ لا يوجد أساساً إلا هيكلٌ عظميٌّ بشريٌّ واحد: وعندما نفهم الهيكلَ العظميَّ، فإننا نفهمه أكثر عن طريق مراقبتنا لتفصيل الملابس. ويمثِّل تقديم الطاقة علامةً على بروز التجريد في الفيزياء وعلى التنوير الاستثنائيِّ الذي انتشر في العالمِ بفضلِهَا.

وقد استغرقَ انتشارُ هذا النور في العالَمِ نصفَ قرنٍ. وفي بداية القرن

التاسعِ عَشَرَ، كانتِ الطاقةُ ماتزالُ مصطلَحاً أ[illegible]يًّا؛ وبحلول منتصفِ القرنِ، استولت عليها الفيزياء. ويعود القبولُ النهائيّ لمصطلحِ الطاقة إلى تاريخٍ لا يمكن تحديدُه بدقَّةٍ إلى حدٍّ ما، ذلك أنه في عام 1846 كان وليام طومسون W. Thomson (1824-1907) مايزال يكتب أن «الفيزياء هي علم القوّة»، لكنه كتب عام 1851 أن «الطاقةَ هي المبدأُ الرئيسيُّ». وقد حدث هذا الانتقالُ على مرحلتين: أولاها في دراساتِ حركةِ الجسيماتِ المنفردةِ (من ضمنها الجسيماتُ التي نسمّيها كواكبَ)، ثم في عمل المجموعاتِ المعقَّدةِ التي نسمّيها الآلاتِ البخاريّةَ.

انبثق فجرُ الجسيماتِ في سلسلةٍ من تجلِّيَّاتِ التّنويرِ خلال السنوات الأولى من القرن التاسع عشر. أوّلها، كما سبق ورأينا، اقتراح توماس يونغ أنْ يُسْتعمَلَ مصطلحُ الطاقةِ في الكميّةِ التي نحصل عليها من ضرب كتلة الجسيم بمربّع سرعتِهِ، وقد فُهِمَتْ هذه الطاقةُ للحركة بوصفها قياساً للقوّة الحية vis viva، واعتُبرت مقياساً حسّاساً لقوةِ الأحداثِ التي تأخذ مجراها في مجموعة من الجسيمات. ومن قبيل المفارقة أنه كلما ازدادت القوّة الحيّة لقذيفةِ مدفعٍ، ازدادَ الموتُ والدّمارُ اللذان يمكن أن تحدثهما.

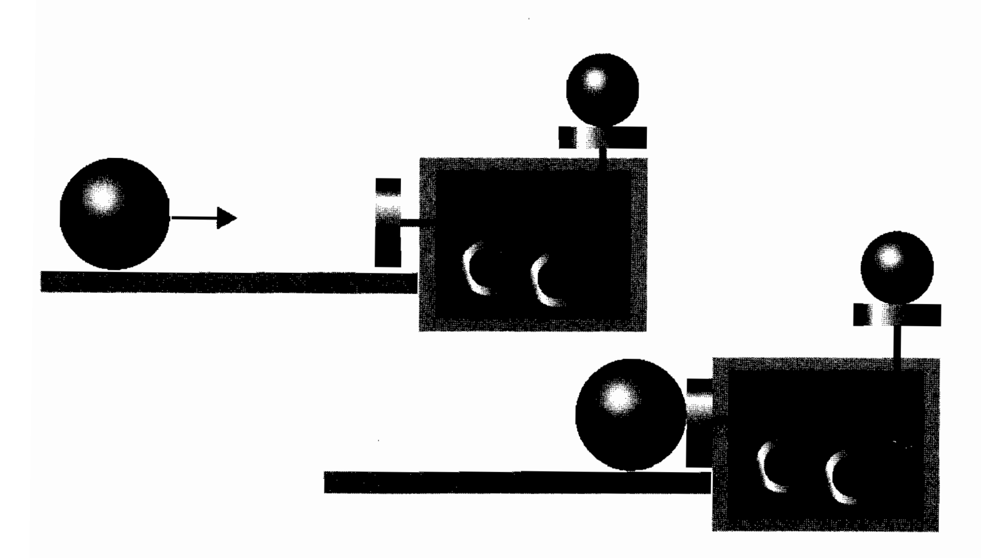
إن تحديد يونغ للطاقة بأنها الكتلة × السرعة^2 لم يكن صحيحاً تماماً. وقد توصّل إلى هذا الاقتراحِ نتيجةَ اعتبارِهِ القوةَ التي يُحدثها جسمٌ متحرّكٌ عندما يصدُم شيئاً ما، وإقرارِهِ البارعِ، إلى حدٍّ ما، بأن القوةَ التي يُحدِثها جسمٌ معطى تزداد أربعَ مراتٍ إذا تضاعفتْ سرعتُهُ. هذا صحيحٌ، لكنّ العاملَ العدديّ في عبارةِ يونغ خاطئٌ. وقد اكتُشِفتْ غلطتُهُ عام 1820 تقريباً، عندما عُرِفَ أن مفعومَ العمل work (الذي سندرسه بعد قليل) يمكن دمجُهُ بقانون نيوتن الثاني، لنستنتجَ أنّ الطاقةَ الناشئةَ من الحركةِ يُعَبَّر عنها على نحوٍ أفضل إذا كانت نصفَ هذه الكمية. وطوال بعض الوقت، كانت الكمية الناتجةُ تسمَّى الطاقة الحقيقية actual energy، لكنّ هذه التسمية تغيّرت بعد مدّةٍ قصيرةٍ وصارتْ الطاقةَ الحركيَّةَ kinetic energy، والآن، يُستعمَلُ هذا المصطلحُ عالَمِيًّا، إذن:

الطاقة الحركية = × الكتلة × السرعة^2

وهكذا، فإن لجسمٍ ثقيلٍ متحركٍ بسرعةٍ طاقةً حركيةً عاليةً، في حين أن للجسم الخفيفِ المتحركِ ببطءٍ طاقةً حركيةً منخفضةً. ويكتسبُ جسمٌ ساقطٌ طاقةً حركيّةً عندما تتسارع حركتُه. وخلافاً للاندفاع الخطّيّ، فالطّاقةُ الحركيّةُ هي نفسُها، أيًّا كان اتجاهُ حركةِ الجسيمِ المتحرّكِ: فللكرةِ التي تتحرك أفقياً بسرعةٍ معطاةٍ نفسُ الطاقةِ الحركيّةِ، بقطع النظر عن اتجاهها، لكنّ اندفاعها الخطّيّ مختلفٌ في كلّ اتجاهٍ تتحرك فيه.

إن «العمل» work الذي أشرنا إليه مفهومٌ حاسمٌ في دراسة الطاقة، ويستحقّ أن تقدِّمَ له تفسيراً مقتضباً. علينا فهم ما الذي يعنيه العلماءُ بالعمل، لأنه يختلف عن معناه في حياتنا اليومية. وفي العِلْمِ ينجَزُ **العمل** عندما يُحَرَّكُ جسمٌ ضد قوةٍ مؤثرة فيه معاكسةٍ في الاتجاه. وكلّما زدنا المسافةَ التي نحرّكُ بها جسماً، ازداد العمل الذي علينا فعلُهُ. وكلّما عظُمَتِ القوّةُ المعاكسةُ، ازدادَ العملُ الذي علينا فعله. إنّ رفع جسمٍ ثقيلٍ بعكس سحب الثقالة (القوة المعاكسة، لأنها تقاوم حركة الثقل نحو الأعلى) يتضمّن إنجازَ قدْرٍ كبيرٍ من العمل. أمّا رفْعُ قطعةٍ من الورقِ عن طاولةٍ فيتضمن عملاً أيضاً، لكنّه عملٌ ليس بالكبير. ورفعُ نفسِ الجسمِ نفسَ المسافةِ على القمر، ذي الثقالة gravity التي هي أضعف، ينطوي على القيام بعملٍ أقلّ ممّا نقوم به على الأرض.

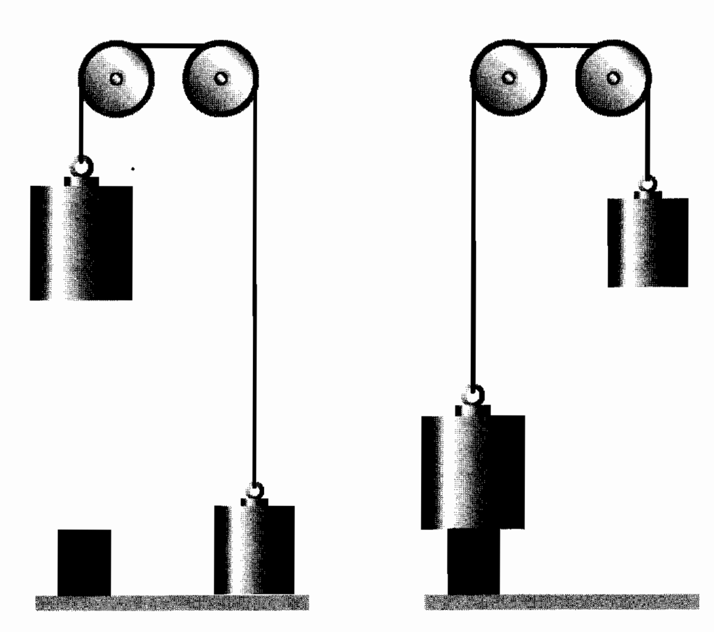
إن رفعَ قطعةٍ من معدنٍ بعكس اتجاه شد الثقالة أكثرُ إثارةً للاهتمام ممّا قد تظنّ. أوّلاً، لنتخيَّلْ أنّنا ندفعها على سطحٍ زَلِقٍ خالٍ من الاحتكاك قد يكون مكوّناً من الجليد. إن القطعة تتسارع طالما أننا ندفعها. وبالنتيجة، تزداد الطاقةُ الحركيّةُ من الصّفْرِ في البداية إلى أيّ قيمةٍ نختارها، أو إلى النقطة التي نصبح فيها مرهقين ونكفُّ عن بذل قوةٍ، علماً بأن القطعة تنزلق عبر الجليد بسرعة ثابتة بعيداً عنا. العمل الذي بذلناه تحوّل إلى طاقة حركية، وهي طاقة الحركة (العامل ، الوارد في عبارة الطاقة الحركية، وُضِعَ للتوثق من أن هاتين الكميتيْن، العملَ المبذولَ، والطاقةَ الحركيةَ المنجزَةَ، متساويتان). ويمكننا الآن أن نغير اتجاهَ هذا التعليق فنقول: لنفترض أن القطعة، التي تتحرك بثبات على منضدة غاليليو دون احتكاك، اصطدمت بشيءٍ غريب الشكل يمكنه تحويلُ حركتها إلى رفع ثقلٍ



الشكل 3-5. يمكن استعمالُ حركةِ جسمٍ لإنجاز عملٍ، لذا فالحركة تمثل شكلاً من الطاقة، تسمّى طاقةً حركيّةً. وفي هذا الجهاز، تشقّ الكرةُ طريقها إلى الكبّاس piston، وتتحوّل حركةُ الكبّاس، بواسطة سلسلةٍ من التروس gears، إلى رفْع ثقلٍ ممثَّلٍ بكرةٍ أخرى. إن العمل المبذول في رفع الكرة الثانية (الذي يتناسب مع ثقلها والارتفاعِ الذي تصلُ إليه) يساوي الطاقةَ الحركيّةَ للكرة المتدحرجةِ.

(الشكل 3-5). عندئذٍ تتحوّل كلُّ الطاقة الحركيّة إلى عَمَلٍ، وهو نفس العمل الذي نبذلُهُ في التسارع بدايةً.

تحثّنا هذه الملاحظة على تقديم التعريفِ التالي: الطّاقة هي القدرة على القيام بعملٍ. وهذا، في الواقع، هو الحقيقة الكاملة للطاقة. وحيثما تقابلُ مصطلحَ الطاقةِ مستعملاً في سياقٍ تَقَنِيٍّ لا أدبِيٍّ، فكلُّ ما تعنيهِ هو قدرتُهَا على القيام بعملٍ. وإنّ قدراً كبيراً من الطاقة المختزَنَة (كتلة ثقيلة متحركة بسرعة) يمكنه، مبدئيًّا، إنجاز قدْرٍ كبير من العمل - رفعُ وزنٍ ثقيل إلى عُلُوٍّ كبير. والجسم الذي لا يمتلك سوى كميةٍ قليلةٍ جدًّا من الطاقةِ (كتلة خفيفة متحركة ببطءٍ) لا يمكنه إلا بذل كميةٍ قليلةٍ من العمل - رفع وزنٍ خفيفٍ إلى عُلُوٍّ ضئيل. ومضاعفةُ سرعة جسمٍ مرتيْن تضاعفُ العملَ الذي يمكن للجسم بذلُهُ أربعَ مرّاتٍ.



الشكل 3-6. مع أنه قد يكون جسماً ساكناً، فربما يمتلك طاقة بفضل موقعه: وهذا النوع من الطاقة يسمى الطاقة الكامنة potential energy. الوزن الثقيلُ في اليسار جاهز للهبوط. وفي اليمين، هبط الوزن الثقيل إلى المنصّة، وفي هذه العملية، ارتفعَ الوزن الخفيفُ. لذا فإن الوزنَ الثقيلَ بذل عملاً، ومن ثُمّ لا بد أن يكون امتلك طاقةً في البداية. هذه الطاقةُ كانت طاقتَهُ الكامنةَ الأصليَّةَ.

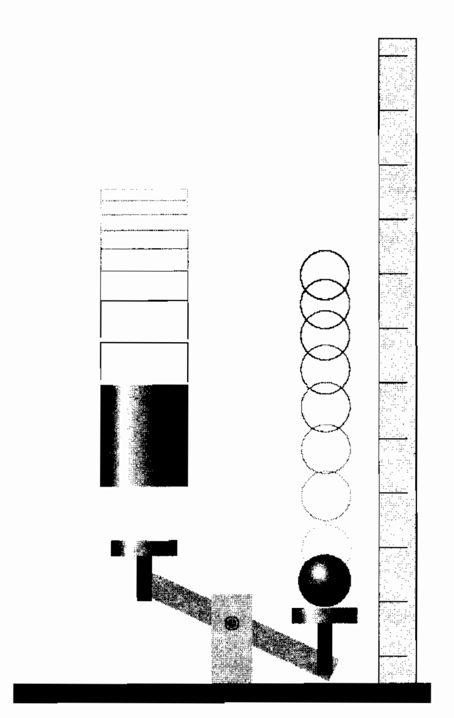
لننقمِ الآن بالخطوةِ التاليةِ. لنفترضْ أننا نرفعُ ثقلاً إلى عُلُوٍّ معيَّنٍ، ونربطُهُ بسلسلةٍ من البكراتِ التي تستطيع رفعَ ثقلٍ آخر (الشكل 3-6) فعندما نترك الثقلَ الأوّلَ، يقومُ برفعِ الثاني، أي أنه يقوم بعملٍ. لذا فإن الوزن الأول، مع أنه لم يكن متحركاً في البداية، يملك القدرة على القيام بعمل. لذا فإنه كان يملك طاقةً. هذه النوع من الطاقة، وهي الطاقة التي يملكها جسمٌ بسبب كونه موجوداً في موقعٍ معيَّن، تُسمَّى الطاقة الكامنة potential energy. وقد وَضَعَ هذا المصطلحَ عام 1853 المهندسُ الاسكتلنديُّ وليام ماكورن رانكين W. M. Rankine (1820-1872)، وهو أحدُ مؤسسي علم الطاقة، وسنقابله في سردنا لقصة الطاقة ثانيةً[5].

(5) لاثنين من مؤسسي علم الطاقة، وتحديداً علم الترموديناميك، موازين حرارة تسمى باسميهما. وقد تخلّد اسم طومسون (اللورد كلفن) لسلّم كلفن Kelvin scale الذي أدنى درجة حرارة فيه هي الصفر المطلق (-273 درجة مئوية)، وتخلّد اسم رانكين في سلم رانكين Rankine scale، الذي الصفر المطلق فيه هو -460 درجة فرنهايتية.

وفي هذه المرحلة، نرى أن ثَمَّةَ نوعيْن اثنيْن من الطاقة ـ الطاقة الحركيّة (القدرة على إنجاز عملٍ نتيجةَ الحركة)، والطاقة الكامنة (القدرة على إنجاز عملٍ بفضل الموقع). ومع أنكَ ستقابلُ غالباً مصطلحاتٍ مثل «الطاقة الكهربائيّة»، و«الطاقة الكيميائيّة»، و«الطاقة النوويّة»، فلا وجود في الحقيقة لمثلِ هذه الأشياء: فهذه المصطلحاتُ مجرّدُ مصطلحاتَ ملائمةٍ ومختصرةٍ مخصّصةٍ لمجموعاتٍ مؤتلِفَةٍ من الطاقتيْن الحركيّة والكامنة. فالطّاقة الكهربائية هي أساساً الطاقةُ الكامنةُ لإلكتروناتٍ مشحونةٍ سلبيًّا في وجود شحناتٍ موجبةٍ. أما الطاقةُ الكيميائيّةُ فتنطوي على تعقيدٍ أشدّ قليلاً، لكن يمكن إرجاعُها إلى الطاقةِ الكامنةِ للإلكتروناتِ في الجزيئاتِ والطاقةِ الحركيّةِ لحركتِها خلالَ دورانها داخلَ الجزيء. الطاقة النوويّة تشبه ذلك، لكنها تنشأ من تفاعلاتٍ وحركةِ الجسيماتِ العنصريّةِ (دون الذّرّيّة) subatoic داخلَ النوى الذرّية. والاستثناء من هذا الشمولِ لمصطلحي الطاقةِ الحركيّةِ والطاقةِ الكامنة هو طاقة الإشعاع الكهرمغناطيسي (مثلاً، طاقةُ الضوء، كتلك التي تُحمَلُ من الشمس إلى الأرض، وتُستعمَلُ في تدفئتنا أو في دفع عمليةِ التركيب الضوئي photosynthesis وإنتاج الغذاء). وفيما يتعلّق بالطاقةِ المختَزنةِ في المادة، فهي مكوّنة كلّيًّا من الطاقتيْن الحركيّةِ والكامنةِ. ولذلك فإننا، حتى الآن، ندرك فعلاً كل ما يجب معرفته عن الطاقة.

●

حسناً إلى حدٍّ ما. فنحن لا نعرف يَّ شيءٍ عمّا تحويه الصفحات المتبقية من هذا الفصل، ولا نعرف أن الفصول الأخرى، أيضاً، تعقِّد مفهومَ الطاقة. وتستحقُّ الطاقةُ أن نتحدث عنها مطوَّلاً لكونها مركزيّةً في الكون وفي جميع البُنى والأحداث التي تجري فيه. وفي الحقيقة، فالأساسان المكينان للعلم هما السببيَّةُ causality، أيْ تأثيرُ حَدَثٍ في حدثٍ تالٍ، والطاقةُ. السببيّةُ هي، أساساً، الانسجامُ والتّرابطُ المنطقيُّ لسلسلةِ الأوامرِ التي تُبقِي الكونَ في حالةِ حركةٍ، والتي نفكّها لبلوغ فهمها؛ الطاقةُ هي الحارسُ، المفتوحُ العينيْنِ أبداً، والذي يؤكد أنّ السببيةَ لا تستدعي إلاّ الأفعال المشروعَة. وكما سنرى، فإن الطاقةَ هي بحقٍّ عِمْلَةُ المحاسبةِ الكونيّةِ.



الشكل **7-3**. في هذا الشكل المجرّد لجهاز «اختبرْ قوّتَكَ»، تقوم الطاقة الحركيّةُ للوزن الساقط في اليسار بدفع الكرةِ الموجودةِ في اليمين نحو الأعلى. وبذلك تتحوّلُ الطاقةُ الحركيّةُ للوزن الساقط (الذي قد يكون مِطْرَقَةً) إلى عملٍ لرفعِ الكرةِ.

لنبدأ بتعرّف مكنونات مفهومِ الطاقةِ. الطاقةُ الكامنةُ هي كامنةٌ لأنّ من الممكن تحويلها إلى قوةٍ حقيقيةٍ، وهي الطاقة الحركيّة. لنفترض أننا قطعنا الحبل الذي يُربَطُ به وزنٌ من أعلاه. عندئذٍ يسقط الوزن إلى الأسفل (نحن نجري هذه التجربةَ على الأرض في حقلها التثاقليّ)، ويتسارع خلال سقوطه. وفي اللحظة التي تسبقُ اصطدامَهُ بالأرض، يكونُ قد اكتسبَ قدْراً كبيراً من الطاقة الحركيّةِ، وَفَقَدَ كلّ طاقتِهِ الكامنة[6]. إنه ما زال يملك القدرةَ على بذل عملٍ. وبتصميم أداة ملائِمة، يمكننا انتزاع الطاقة الحركية بجعل الوزن الساقِطِ يضربُ رافعةً تدفعُ وزناً آخَرَ نحو الأعلى، وهذا يشبه ما كان يقومُ به الناسُ الأقوياءُ قديماً بضربهم رافعةً بمطرقة تدفع وزناً إلى الأعلى نحو جسم جرسي (الشكل 7-3). وفي الحقيقة، فإن هذا يلخص تماماً المحتوى المركزيَّ لهذا

(6) من المتفق عليه في الأحداث التي تجري قريباً من سطح الأرض، أن للجسيمات الموجودةِ على سطحها طاقةً كامنةً تثاقليةً صفريةً.

الفصل. علينا الاستنتاجُ أنّ الطاقتيْن الحركيةَ والكامنةَ يمكن تحويل إحداهما إلى الأخرى بحرِّيَّة.

وتستدعي أيضاً التجربةُ التي أجريناها أن الطاقةَ الكليّةَ total energy، وهي مجموع الطاقتيْن الكامنةِ والحركيّةِ للوزن الأوّل، ثابتةٌ. وهكذا فإننا نتوصل إلى انحفاظ الطاقة، وهي ملاحظةُ أنّ الطاقة لا يُمكنُ خلقُهَا ولا إفناؤها، وأنّ الطاقة الكليّة ثابتةٌ. من الممكن إثبات هذا الاستنتاج باستعمال قانون نيوتن الثاني، لذا فإن ذلك القانونَ هو تقريرٌ لانحفاظ الطاقة، تماماً مثل كون القانون الثالث تقريراً لانحفاظ الاندفاع.

وقد رُبِطَ كِلاَ قانوني الانحفاظ اللذيْن قابلناهما (الاندفاع الخطيّ والاندفاع الزاويّ) بالتناظر، وأخبرانا، بشيءٍ يتعلق بشكل الفضاء. والسؤال الواضح الذي يخطر الآن في الذّهن هو ما إذا كان انحفاظُ الطاقة نتيجةً للتناظر. وسنرى في الفصل 9 أنه علينا عدمَ التفكير في الفضاءِ وحده، لكنْ في الزَّمْكَانِ spacetime، وأنّ الزمنَ يجب أن يُعامَلَ على قَدَمِ المساواةِ مع الفضاء (المكان). يجب أن نكونَ قادرين على إدراك أنه في حين ينبثق انحفاظ الاندفاع من شكل الفضاء، فإن انحفاظ الطاقة ينبثق من شكل الزمن. هذا هو الحال في الواقع، وحقيقة أنّ الطاقة منحفظةٌ تنبثق من حقيقة كوْن الزمن غير تكتّليٍّ، بمعنى أنه ينتشر بسلاسةٍ من الماضي إلى المستقبل دون تقليصِ قِطَعٍ منه أو تمديد قِطَعٍ أخرى. إنّ العلاقة بين قوانين الانحفاظِ وتناظرِ الزّمكانِ وثيقةٌ جدًّا إلى درجةٍ تجعل قوانينَ الانحفاظِ حيّةً وباقيةً حتى عندما تنهار قوانينَ نيوتن في الحركة، ذلك أنّ انحفاظ الاندفاعِ والطاقةِ يَبْقَيَان على قيد الحياة حتى في النسبية والميكانيك الكوانتيّ (الكموميّ).

وبسبب كون قانون نيوتن الثاني هو حقًّا تقريراً لانحفاظ الطاقة، فبإمكاننا رؤيةُ أنّ القانونَ هو نتيجةٌ مباشرةٌ لسلاسة الزمان، تماماً مثلما يكون القانون الثالث نتيجةً مباشرةً لسلاسة المكان. هذا وإن معظم العلماء الآن يَرَوْنَ في هذا التفسيرِ أكثرَ إقناعاً من تفسير العالِمِ المتديِّنِ بحماسٍ، طومسون Thomson،

وكثيرٍ من معاصريه المتحمّسين، الذي مفاده أن انحفاظ الطاقة يُعتبر نتيجةً لفضل اللّه وكرمه. وهم يحاجّون في أن اللّهَ منحَ العالَمَ هبةَ الطاقةِ وأن الطاقة لا يُمكن زيادتُهَا بالابتكارات البشرية، ونظراً إلى كونها مقدَّسةً، فلا يمكن إفناؤُها نتيجة أيٍّ من نشاطاتنا.

●

هذا التحليل لسلوكِ الجسيمات بدلالة الطاقة الحركيّة، والطاقة الكامنة، وانحفاظَ الطاقةِ، أصبح راسخاً ومتداوَلاً في الفيزياء بحلول عام 1867 عندما نُشِرَ بحث طومسون وتيت Tait بعنوان بحث في الفلسفة الطبيعية Treatise on natural philosophy وبحلول ذلك الوقت تكوّن إدراكٌ بأن مفهومَ الطاقةِ يساعد على توحيد جميع فروع الفيزياء. وهكذا، ففي عام 1847، استعمل هيرمان فُونْ هِلْمُهولْتْزْ H. Von Helmholtz (1821-1894)، المتعددُ الثقافةِ، هذا المفهومَ ليبيّن الوحدةَ الكامنةَ بين الميكانيكِ، والضوءِ، والكهرباءِ، والمغنطيسيّةِ. لكنْ، وبرغم هذا النجاح، كان ثَمَّةَ مشكلةٌ مزعجةٌ هَدّدَتْ هذه الوحدةَ كلَّها، هي مشكلةُ الحرارةِ.

ظلّت الحرارةُ لمدةً طويلةً، ظاهرةً غامضةً، لكنّ اختراعَ الآلة البخارية، واستقلالَ الاقتصاداتِ الوطنيةِ، ثم النجاح في الحرب والتجارة، كلّ ذلك نقل الحرارةَ لتشغَل موقعاً مركزيًّا في الاهتمام العلميّ. لكنّ المشكلَةَ لم تكن مقصورةً على الجهل بطبيعة الحرارة، إذْ بدا أنّها واقعةٌ خارجَ مجالِ الفيزياء المعاصرةِ.

كان الكثيرُ من العلماء يظنُّون، أمداً طويلاً، أنّ الحرارةَ مائعٌ يسمى كالوريك caloric (وهذا الاسمُ مأخوذٌ من الكلمة اللاتينيّة calor التي تَعنِي «الحرارة»)، وهو أحدُ الموائعِ «غيرِ القابلةِ للوزنِ»، بل التي ليس لها وزنٌ، والتي كان يحبها الباحثون الأقدمون. لم تكن الحرارةُ غيرَ قابلةٍ للوزن فحسب، بل إنها كانت «بارعةً» بمعنى أن بإمكانها اختراقَ أيِّ مكانٍ، حتى بين الجسيمات التي كانت مرصوصةً معاً بإحكامٍ. قد نسخر من مِثْلِ هذه الأفكار الخاطئة، لكنْ ما مِنْ أَحَدٍ

في هذه الأيام قادر على تفسير ما تعنيه كلمةُ «حرارةٍ»، وأكثر من ذلك، فإن لغةَ caloric مازالتْ تسودُ لغتَنا اليوميّة، لأننا نتحدث عن الحرارةِ بأنها «تتدفّق» مثلما تنتقُل الحرارةُ من جسمٍ ساخنٍ إلى جسمٍ باردٍ.

أُلغيتْ كلمةُ caloric من العِلْمِ عام 1789 من قِبَلِ العالِمِ والمخترعِ والسياسيّ ومطارِدِ النساءِ والجنديِّ والمنافقِ والمُحْسِنِ والمُصْلِحِ والجاسُوسِ بنجامين طومسون B. Thompson، كونت رمفورد (1753-1814). وُلِدَ طومسون في ماساتشوستس، وهرب إلى إنكلترا عام 1776، وأسّس المعهد الملكيّ عام 1799، ثم سافر إلى بافاريا، حيث عُيِّنَ وزيراً للحرب، ووزيراً للداخلية، ومسؤولاً في المحكمةِ، ومستشارَ دولةٍ، وكُونْتاً count في الإمبراطوريّةِ الرومانيّةِ المقدّسةِ. وقد اختار لقبَهُ من اسمِ مدينة رمفورد Rumford (الذي تحوّل فيما بعد إلى Concord)، والذي صار الآن نيوهامشير، حيث وُلدت أُولَى زوجاته[7]. وقد أُلغيتْ كلمةُ caloric نتيجةً لملاحظةِ طومسون وجودَ ثقب في المدفع الذي كان يشرف عليه في مستودع أسلحة ميونيخ. فقد كتب: يوجد 18.77 ليبرة من الماء في وعاء من السنديان. درجة الحرارة الابتدائية 60 درجة ف؛ بعد أن قام حصانان بإدارة المخرطة مدة 2 1/2 ساعة، بدأ الماء بالغليان.

كانت استنتاجاتُهُ من تجاربه أنّ من الممكن توليدَ الحرارةِ باستمرارٍ، وأنها لا تنضَبُ، وأنه يجب توليدُها بواسطةِ الاحتكاك، ومن ثَمَّ فمن الضروري اعتبارُهَا بوصفها حركةَ الجسيمات التي يتكوَّن منها معدنُ المدفعِ، بدلاً من كونها مائعاً مخفيًّا في المعدن.

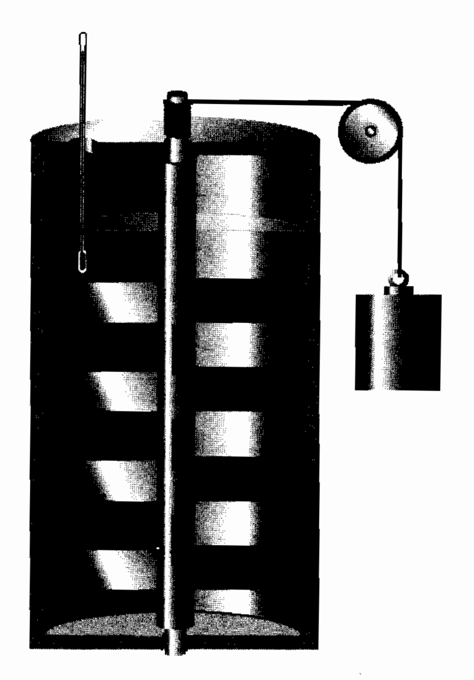
كان لا بد من قطْعِ مسافةٍ طويلةٍ قبل إدخال الحرارة بأسلوبٍ كَمِّيٍّ في العلم، وتحديدِ طبيعتِهَا الذَّرِّيَّةِ الحقيقيَّةِ، وأخيراً إقحامها في قانون انحفاظ الطاقة. وقد نشأ الدافع لفهم الحرارة، كما سبق وذكرنا، من الأهميّة المركزية للآلة البخارية في الصناعة، وليس من المفاجىء أن تكون معظمُ التطوّراتِ التي أدّتْ

(7) وفي وقت لاحق استولت على قلبه مدام لافوازييه بعد أن سلبَتْ قلبَ زوجها أنطوان امرأةٌ أخرى (الفصل 5). لكن زواجهما لم يكن ناجحاً.

إلى فهمنا الحاليّ للحرارة أنجزَهَا علماء من شمال بريطانيا، كان مركزهم في غلاسكو ومانشستر، وكان لهم علاقاتٌ وثيقةٌ بالصناعة.

إن أحد المواضيع التي سيتكرّر ورودُها في هذا الكتاب هو أن إحدى علامات التقدّم العلميّ تتجلّى في إلغاء الثوابت الأساسية. وفي القرن التاسع عشر (ويجب الاعتراف أنه، في أجزاءٍ من العالَمِ في القرن الواحد والعشرين) كان العمل يُقاسُ بمجموعةٍ وحيدةٍ من الوحدات الأخرى (الكالوريات). وهاتان الوحدتان، اللتان كانتا تُستعملان لقياس هاتيْن الكميتيْن، حَجَبَتَا حقيقةَ أنّ هاتيْنْ الكميتيْن كانتا في الحقيقةِ شيئاً واحداً. وقد استُهلِكَ جهد كبير خلال القرن التاسع عشر في محاولة قياس «المكافىء الميكانيكيّ للحرارةِ»، والعملِ الذي يمكن الحصول عليه من كميةٍ معطاةٍ من الحرارة، وإيجادِ عاملِ تحويلٍ من الكالوريات إلى وحدات الإرغ. كان هذا الجهدُ جزءاً أساسيًّا من التقدّم العلميّ، وجزءاً من الأساس التجريبيّ لقانون انحفاظ الطاقة. بيد أنه، من وجهة نظرنا الحاليّة، كان ذلك كلُّه هدْراً للوقت. لا تَظُنَّنَ أنني مخطىء: إنه كان هدراً مفيداً للوقت. كان مفيداً لأنه ساعد على إظهار أنّ الحرارةَ هي أحدُ أشكال الطاقة، وأنه لا يمكن توليدُ عملٍ أكثر من الحرارة الممتصّة، وأنه لا يمكن توليد حرارة أكثر من العمل المبذول. كان هذا هدراً للوقت لأننا بعد أن عرفنا الآن أن العمل والحرارة سمتان لشيءٍ واحدٍ، هو الطاقة، لذلك نقسيهما بنفس الوحدات، ولم نعد بحاجةٍ إلى التحويل من وحدة إلى أخرى.

إن الشخص الذي يعود إليه الفضل في هدر وقته بمثل هذه الطريقة المثمرة هو جيمس جول J. Joule (1818-1889)، المولودُ في مانشستر لأبٍ غنيٍّ يعمل في صناعة الجِعة. لذا كان يملك التمويلَ اللازمَ ليتابعَ بحوثَهُ إلى أنْ نَفِذَتْ أموالُهُ عام 1875 تقريباً. وفي تجربته الذائعةِ الصيتِ، استعمل جول دواليبَ التّجديف الدوّارة rotating paddle wheels المدفوعةَ بثقلٍ ساقطٍ لتحريك الماءِ، وقاسَ ارتفاعَ حرارة الماء (الشكل 3-8. لذا استطاع إثبات أنّ من الممكن تحويلَ العمل إلى حرارةٍ. ولدى مقارنة العمل اللازم لرفعِ درجةِ حرارةِ الماءِ ليحصلَ على كميةِ الحرارةِ اللازمة لإنجازِ نفسِ الأثرِ، استطاعَ قياسَ المكافىء الميكانيكيّ



الشكل 3-8. شكل مثالي لجهاز جول لقياس المكافئ الميكانيكي للحرارة. يقوم الوزن الساقط بدفع صناديق عجلة التجديف عبر الماء داخل الحاوية المعزولة. ومن الممكن حساب العمل المبذول استناداً إلى المسافة التي قطعها الوزن خلال سقوطه. درجة حرارة الماء مراقَبَةٌ، ومن ثم يستعمل الارتفاع في درجة الحرارة لحساب الحرارة المطلوبة للوصول إلى نفس النتيجة.

للحرارة. ومع أنه تمكّن من قياسِ هذه الكميّةِ التي تُعتَبَرُ غيرَ مفيدةٍ الآن، فإن يستحق الثناء الكبير لتوصُّلِهِ إلى التكافؤ بين الحرارة والعمل، ومن ثَمَّ إثباته أنّ الكميةَ التي صَرَفَ وقتاً طويلاً في محاولةِ قياسِهَا كانتْ غيرَ مهمّةٍ. وبغية تخليد إسهامه هذا، فإن الوحدات التي يُقاس بها كلا العملِ والحرارةِ، والطاقة كذلك، هي الجُولُ joule[8]. والجُولُ (J) وحدةٌ صغيرة جدًّا من الطاقة: فكلُّ خفقةٍ في قلبِ الإنسان تُنْجِزُ قرابَةَ جولٍ واحدٍ من العمل. وفي كلّ يومٍ يخفق قلبُكَ قرابة 100000 مرّةٍ، لذا فهو ينجز زهاء 100000 جولٍ من العمل الذي يدفع الدَّمَ عبرَ جسمكَ، ومن ثَمَّ يتعيَّنُ عليكَ استهلاكُ ما يكفي من الغذاء لتوفير تلك الكميةِ من الطاقةِ التي تُبقيك على قيد الحياة.

أثبتَ العملُ الذي قام به جول ومعاصروه أن العمل والحرارة هما، دون شكٍّ، شكلان من أشكال الطاقة، وأنه عندما نُدخُلُهمَا في الحسبانِ، فإنّ الميزانية

(8) الجول الواحد (1J) هو العملُ الذي تقوم به قوةٌ مقدارها نيوتن واحد (1N)، عندما تُزاحُ نقطةُ تأثيرها متراً واحداً باتجاه القوة.

العمومية balance sheet للطاقةِ تظلُّ سليمةً، وحتى الآلاتُ التي تعمل بتثاقلٍ باستعمال الحرارةِ والبخارِ الصاخبِ، والتي لم تكن مجموعةً أبسطَ كثيراً من الجسيمات التي تكوِّنُ الأجسامَ التي تعالَجُ بميكانيك نيوتن، فقد ثبت أن طاقتها كانت منحفظةً.

إن صحة قانون انحفاظ الطاقة الذي قُبِلَ عالميًّا، تُلغي احتمال آلة الحركة الدائمة التي كان يجري العمل على إنتاجها. آلةُ الحركة الدائمةِ perpetual motion machine هي جهاز يولِّد عملاً دون استهلاكِ وقودٍ، أي أنها توجِدُ طاقةً. بيد أن طاقة المحتالين تبدو دائمة، ثمّ إن الآلاتِ العجيبةَ للحركة الدائمة مازالت تُعْرَض، وعندما يجري تحليلُها أو تفكيكُها، يتبيّن الخداعُ. نحن جدّ واثقون بأن الطاقةَ منحفظةٌ، ولم يَعُدِ العلماءُ (ومكاتبُ تسجيل براءات الاختراع) تقبل ادّعاءاتِ إنتاجها جدِّيًّا، والآن، يُعتبر البحث عن الحركةِ الدائمةِ مهنةً تسودها النزواتُ.

●

وعلى الرغم من أنّ العملَ والحرارةَ وجهان للطاقَةِ، فثمةَ فرقٌ بينهما، كما تُوحي بذلك الفطرةُ السليمةُ. والفهمُ الكاملُ للحرارةِ والعملِ، وكيف أنّهما مظهران للطاقةِ، لا بد أن ينتظرا تطوّرَ الفهم الجزيئيّ لتميُّزهما. وكما يَحْدُثُ غالباً في العِلْمِ، فقد رافق هذا الفهمُ إدراكُ أنهما لم يكونا موجودين: بمعنى أنه لا وجود لشيءٍ كالحرارةِ، ولا وجود لشيءٍ مثل العمل! ولمّا كنّا محاطين بكليهما في حياتنا اليومية، فلا بد من وجود شيءٍ في هذه الملاحظة أبعد مما تراه العين. لندرس هذا الموضوع.

أولاً، ما الذي أعنيه عندما أقولُ ـ بتناقضٍ ظاهريٍّ وخلافاً لكلّ ما جرى قولُهُ سابقاً ـ إن الحرارةَ والعملَ كليهما شكلان من أشكال الطاقة؟ النقطةُ الحاسمةُ هي أنهما كليهما طريقتان لنقل الطاقة من موقعٍ إلى آخر. العملُ طريقةٌ لنقلِ الطاقة؛ والحرارةُ طريقةٌ أخرى. لا وجود لشيء مثل «العمل» المختَزَن في محرّكٍ يُمكن إخراجُهُ خلال سَوْقِ سيّارتنا في طريقٍ، أو خلال رفع حِمْلٍ.

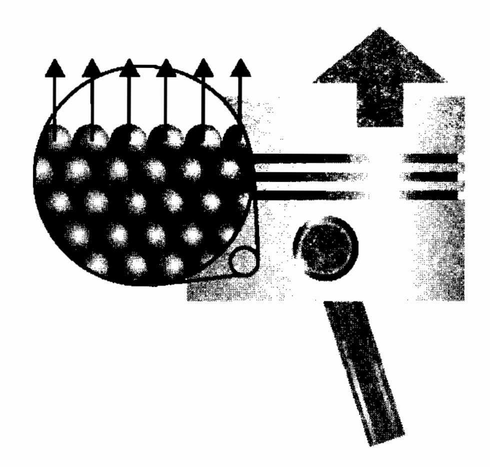
وبالطريقة نفسها تماماً (مع أنها تخالف الطريقة التي نستعمل بها المصطلح في محادثاتنا العادية)، لا وجودَ أيضاً لشيءٍ مثل «الحرارةِ» المختزَنة في جسم، حتى لو فكّرنا في هذا الشيء أنه حارٌّ. الحرارةُ هي طريقةٌ لنقل الطاقة: إنها طاقةٌ في حالة مرور، وليست طاقةً يمتلكها شيءٌ ما. ربّما كان بمقدورك رؤية أنه إذا تعيَّن عليَّ إيضاحُ مفهومِكَ لما نعنيه بالحرارة، فيجب عليك نبذُ كلِّ مفاهيمك السابقةِ المستندةِ إلى الاستعمال العامِّيِّ غيرِ الدقيقِ لهذا المصطلح في المحادثات اليوميّة. ولصوغ مصطلحٍ، غالباً ما يختار العلماءُ كلمةً مألوفةً، بعد أن ينزعوا اللحم والدهن عنها، ثم يستخدمون العظمةَ المتبقيّةَ تحتهما. وغالباً ما يهذِّبُ العلماءُ اللغةَ، لا لتكون مائعةً وباردةً، ولا حتّى للقضاء على حيوية الشعراء، بل ليعرفوا حقًّا ما الذي يتحدثون عنه.

العمل هو طاقة منقولةٌ بطريقةٍ تسمح للطاقة ـ مبدئيًّا على الأقل ـ بأنْ تُستعمَلَ لرفعِ وزنٍ (أو، بوجهٍ أعمّ، لتحريك جسمٍ بعكس قوةٍ مؤثرةٍ فيه). لم يكن هناك عَمَلٌ مختزنٌ في المحرّكِ قبل الحدث: لم يكن ثمة شيء مختزن في الشيء الذي حُرِّك بعد الحدث. ما كان مخزوناً في المحرِّكِ قبل الحديث هو هذا الشيء المجرّد الذي نُسمِّيهِ طاقةً؛ وللجسم الذي حُرِّك طاقةٌ أعلى بعد الحدث ـ قد تكونُ طاقته الحركية أعلى، أو أنه إذا كان وزناً مرفوعاً، فربّما كانتْ طاقتُهُ الكامنةُ أعلى. لقد انتقلت الطاقةُ من المحرِّكِ إلى الشيءِ عن طريق العمل: فالعمل أداةٌ للانتقالِ وليس الشيء الذي انتقل. لن تمر الكلمة المراوغة «مبدئيًّا» دون أن تلاحَظ. إنها تعني، في هذه الحالة، أن الطاقة المغادرة للمحرِّكِ (أو أيِّ جهازٍ ننظر فيه) كان من الممكن استعمالَها لرفعِ ثقلٍ حتى لو يحدث ذلك حقيقةً. فمثلاً، ربّما كان من الممكنِ الإفادةُ من العمل لتشغيل مولِّدٍ يدفع تياراً كهربائياً عبر سخّانٍ كهربائيٍّ. المنتَجُ النهائيُّ ماءٌ ساخنٌ بدلاً من وزنٍ جرى رفعُهُ. بَيْد أنه كان بمقدورنا استعمالُ الطاقةِ لرفعِ ثقلٍ، وهذا يعني أننا استعملناها بوصفها عملاً.

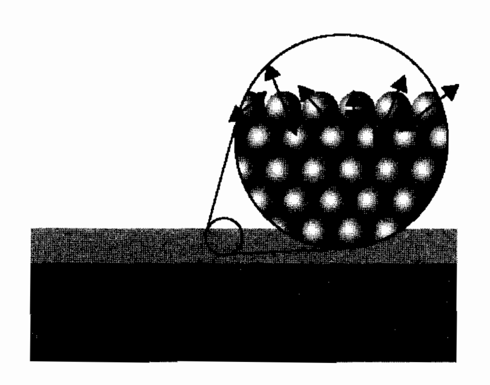
الحرارةُ هي طاقةٌ منقولةٌ نتيجةَ فرقٍ في درجة الحرارة، إذْ تنتقل الطاقة من حارَّةٍ (درجة حرارة عالية) إلى باردةٍ (درجة حرارة منخفضة). لا توجد

حرارةٌ مخزونةٌ في المنبع قبل الحدثِ؛ ولا وجود لحرارةٍ مخزونةٍ في الجسم المستقبِلِ بعد الحدث. كان ثمة طاقةٌ مختزَنَةٌ في المنبع قبل الحدث؛ وللجسم الذي جرى تسخينه طاقة أعلى بعد الحدث ـ بعض الماء، مثلاً، قد يكون قد تبخّر، أو بعضُ الجليد قد انْصهرَ. لقد جرى نقل الطاقة من منبعٍ إلى جسمٍ عن طريق الحرارةِ، فالحرارة هي أداة الانتقال، لا الشيء المنقول.

يتّضح كلّ شيء عندما ننظر في الأشياء بمقياسٍ جزيئيٍّ. لنفترض أننا استطعنا النّظرَ إلى حركةِ الذرّاتِ خارجَ المحرِّكِ. وتحديداً، لننظر عن كثبٍ، عن كثبٍ تماماً، إلى المكبس الذي يُدفَع بفعل غازٍ متمدِّدٍ (في محرِّكِ سيارةٍ) أو تدفقِ بخارٍ (في محرّكٍ بخاريٍّ). لو كان باستطاعتنا رؤيةُ ذرّات المكبس، لرأيناها جميعاً تتحرّك بنفس اتجاه حركة المكبس (الشكل 3-9). هذا وإن الحركةَ الماكروسكوبيَّة الملاحظَةُ هي الحركةُ المنتظمةُ لعددٍ لا يُحصَى من الذّرّات. لا يوجَدُ مكبسٌ في عنفةٍ بخاريّةٍ؛ وبدلاً من ذلك، تدفعُ قوةُ البخار شفراتِ العنفةِ للدوران، ويمكننا استعمالُ هذه الحركةِ لتقومَ بعملٍ. وإذا كان باستطاعتنا رؤيةُ ذرّاتِ الشفراتِ،



الشكل 3-9. عندما يُنْجَزُ عملٌ، فإن الطاقةَ تنتقلُ بطريقةٍ بحيث تُحَرَّكُ الذراتُ بطريقةٍ منتظمةٍ موجَّهةٍ. وعند تكبيرِ هذا المكبسِ الذي يتحرّكُ نحو الأعلى، نرى كيف أن الذرات تتحرّك بانسجامٍ بعضها مع بعض. وهي تنقل هذه الحركةَ إلى شيءٍ موجودٍ على المكبس أو موصولٍ به، وتؤدّي، مثلاً، إلى رفعِ وزنٍ.



الشكل 3-10. حين تُنْقَلُ الطاقة كحرارةٍ، يختلّ نظام حركة الذرات. يمكننا تصوّرُ ذرّات الجسم الساخنِ وجدارِهِ الموصلِ للحرارةِ (الألواح الأفقية) بأنها تهتزّ بقوّةٍ حول مواقعها، ويتصادم بعضها ببعض. وهذا التصادمُ ينقل الطاقةَ إلى المناطقِ المحيطةِ، حيث تكتسب الذراتُ هذا الهياج الحراري thermal motion.

لرأيناها جميعاً تتحركُ بنفس الحركة الدائرية التي تَدُورُ بها الشفراتُ. وعند وَصْلِ سلكٍ بِقُطْبَيْ مدّخِرةٍ (بطّاريةٍ) كهربائيةٍ، فإن الإلكتروناتِ المؤلِّفةِ للتيارِ الكهربائي - تيار من الإلكترونات - تتحرك عِبْرَهُ. ولو كان بمقدورنا رؤية الإلكتروناتِ في السلكِ، لرأيناها جميعاً تتحرك بالاتجاهِ نفسِهِ. من الممكن الإفادةُ من هذا التيارِ الكهربائيِّ لإنجاز عملٍ، مثلاً، عن طريق تَضْمِينِ محرّكٍ كهربائيٍّ في الدّائرة. وفي كل حالةٍ، يكون العملُ مرتبطاً بالحركة المنتظمة للذرات (أو الإلكترونات). هذا هو العمل: إنه انتقالُ الطاقةِ التي تحفّزُ حركةً منتظمةً للذرات في محيطاتها.

ما الذي يمكن قوله عن الحرارة؟ مرةً أخرى، لننظرْ في مجهرٍ خياليٍّ تمكِّنُنَا قوّتُهُ من رؤية حركة الذرات. في هذه الحالة، لا وجود لمكبسٍ أو شفرةٍ عنفةٍ يمكنهما الحركةُ، ولا يوجد جزءٌ قابل للحركة من الجسم الساخن. وبدلاً من ذلك، فإن الطاقة تتسرّبُ خارجاً عبر جدارٍ موصل. والآن، لا وجود لحركةٍ صافيةٍ للذرات المحيطة، لكننا نراها تتهزهز باتجاهِ جيرانها، التي تقوم، بدورها، بتسليمها إلى جيرانها. واختصاراً، فإن انتقال الطاقة كحرارةٍ هو انتقال الطاقة التي تحفّز حركةً عشوائية للذرّات في محيطاتها.

تُسمّى الحركةُ الاهتزازيّة العشوائيةُ للذرات هياجاً حراريًّا thermal motion. إنه ليس حرارةً. الحرارةُ هي أسلوب انتقال الطاقة. لا يجوزُ لنا البتة القولُ إن «الحرارة تُنْقَلُ»، إلاّ إذا فهمنا من ذلك أن تلكَ طريقةٌ ملائمةٌ للقول إنّ

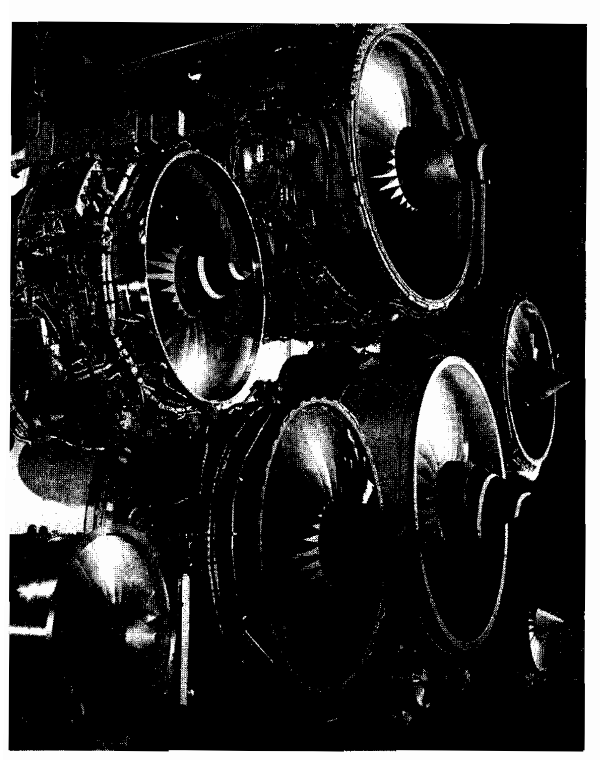
الطاقةَ تُنْقَلُ كحرارةٍ أو بالتسخين. وفي الحقيقة، من الأفضل اعتبارُ الحرارةِ فِعْلاً لا إسماً. الحرارةُ ليستْ طاقةً حراريةً. لا وجودَ لمثل هذا الشيء، مع أن هذا المصطلحَ شائعُ الاستعمالِ (هناك طاقة حركيّةٌ وطاقةٌ كامنة فقط). الحرارة ليست طاقة حرارية. لا وجود لمثل هذا الشيء إلا بوصفه طريقةً ملائمةً للإشارةِ إلى طاقة الهياج الحراري thermal motion[9].

كان للفرق الذرّي بين العمل والحرارة أثرٌ بليغٌ في تطوّر الحضارة. من السهولة بمكانٍ استخلاصُ الطاقةِ كحرارة: فعلى الطاقة التقَلُّبُ في لخبطةٍ عشوائيّةٍ لحركةٍ ذرية. هذا وإنّ قدماءَ البشر كانوا قادرين بسرعة على إنجازها. من الأصعب كثيراً استخراج طاقةٍ على شكل عملٍ، لأن الطاقة يجب أن تبرز حركةً ذريةً مرتبةً. وخلافاً لأجسام الحيوانات، فلمْ يجر بناءُ تجهيزاتٍ لإنجاز هذا الأسلوب المنظّم في الاستخراج (عدا في حالاتٍ متفرّقةٍ نادرةٍ) إلاّ بحلول القرن الثامن عشر، ولإنجاز الفعالية، كان لا بدّ من قضاء قرونٍ في إجراء التحسينات (الشكل 3-11).

●

ويمكننا أن نرى الآن كيف يمكن وضع الحرارة في مكانها الصحيح، وكيف يمكن حقًّا أن تنحفظ الطاقة. ونعني بهذا أنّ وصولنا إلى إدراك أن الطاقة يمكن انتقالها كحرارةٍ أو عملٍ، يسمح لنا بالاستنتاج أن الطاقة تنحفظ في كلا مجال الديناميك dynamics، أي حركة الأجسام المنفردة والتحوّل المتبادل بين الطاقتين الحركيّة والكامنة، وأيضاً مجال الثرموديناميك thermodynamics، وهو التحوّل المتبادل بين الحرارة والعمل. الطاقة هي، بحقٍّ، العملةُ المتداوَلةُ في المحاسبة الكونيّة، لأنه ما من حدثٍ يجري تكون فيه الطاقةُ إما مخلوقةً أو فانيةً. لذا فإن الطاقة نمطٌ من القيد المفروض على الأحداث الممكنة في الكون، لأنه لا يمكن لحدثٍ أن يجري بحيث ينتج منه تغيُّرٌ في الكميّةِ الإجمالية للطاقة في الكون. لا بد أن

(9) أنا متحذلق بالطّبع. عليَّ الإقرار بأن جميعَ الأسماء ـ قطط، كلاب، حرارة، طاقة حرارية، طاقة كيميائية ـ ليست سوى طرائقَ ملائمةٍ للإشارةِ إلى الأشياء. لكنني أودّ تطهيرَ أفكاركم وتنقيتَها.



الشكل 3-11. يبيّن هذا الشكل كومة من الخردة لبعض الأجهزة المعقّدة اللازمةِ لاستخراج الطاقة على شكل عمل. إن القدرة على استخلاص الطاقة بهذه الطريقة، بدلاً من استخلاصها على شكل حرارة، كانت تطوراً حدث في وقتٍ متأخرٍ نسبيًّا من الحضارة.

تكون هذه النتيجةُ قد سرَّت طومسون وكلارك ماكسويل C. Maxwell اللذينْ صارا متحمّسيْن لانحفاظ الطاقة طبقاً لإيمانهما بأن اللّه وهب الكونَ قدراً مثبتاً مختاراً بعنايةٍ من الطاقة عند عمليّة خَلْقِ العالَمِ، وبأنه يتعيّن على الجنس البشريّ أن يقيم احتفالاً بما قدّر اللّهُ، الذي علمه لا حدودَ له، أنه مناسبٌ للبشر.

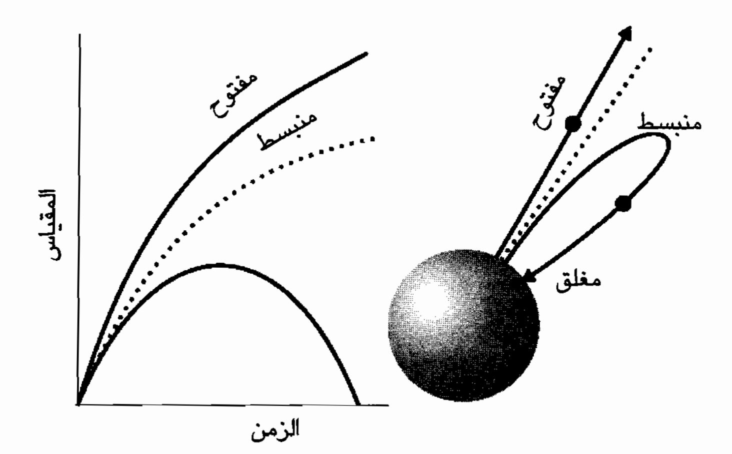
إن السؤال الذي ربما برز أمام طومسون وماكسويل ربما كان تعيين مقدار الطاقة في الكون، لأن هذا سيكون مقياساً لسخاء اللّه: ربما افترضا أنّ هذا المقدار كان غيرَ منتهٍ، لأن أيّ قدْرٍ أقلّ من هذا سيعني وجودَ حدٍّ لِكَرَمِ اللّهِ، وهذا تلميحٌ غير مقبولٍ إلى بُخْلٍ إلهيٍّ. ولمّا كانت الطاقةُ منحفظةً، فلو كان بمقدورنا تقييمُ مقدار الطاقةِ الموجودةِ الآن، فسيكون هذا المقدارُ هو الذي وُهِبَ للعالَمِ أصلاً. وهكذا فما هو مقدار الطاقة الموجودة الآن؟ الجواب الموضوعيُّ هو أننا لا نعرف. بَيْدَ أنّ ثَمَّةَ مِفتاحاً لحلٍّ لغز مقدار الطاقة الكلّيّة.

أوّلاً، علينا أن نتغلّب على أحكامنا المسبقة واتجاهاتنا العقائدية، كما يحدث،

ويجب أن يحدث، دائماً في العالم. لا شكّ في وجود كميةٍ كبيرةٍ من الطاقة: ولإقناعِكَ بذلك، عليكَ التفكيرَ بالبراكينِ والأعاصيرِ على الأرض، وفي لَمَعانِ النجوم، لتستنتجَ أنّ الكون مزوَّدٌ بقدرٍ هائلٍ من الطاقة. وفي الحقيقة، فهناك أكثر ممّا تراه العيْنُ لأنّ الكتلة (كما سنرى بالتفصيل في الفصل 9) معادِلةٌ للطاقة، لذا فالمادة كلّها هي شكلٌ للطاقة (لأن $E=mc^2$). وإذا كان علينا جمع كتلِ كلِّ النجوم في مجرّاتِ الكون المرئيّ، فإننا نجد كتلةً كلّيّةً هائلةً، ومن ثَمَّ طاقةً كلّيّةً هائلةً. بَيْدَ أننا في العلمِ، كما في الحياةِ، يجب أن نكون واعين ومحترسين. ثمة شيء آخر يُضاف إلى الطاقة، هو التجاذب التثاقليّ بين عناصر المادة. التجاذب يقلّل طاقة الأجسام المتآثرة، لذا فكلّما ازداد هذا التجاذبُ، انخفضتْ الطاقةُ. إحدى الطرائقِ للتفكير في ذلك هي أن ننسبَ إلى طاقةِ التجاذب التثاقليّ قيمةً سالبةً، لذا فكلّما ازداد التجاذب، ازداد انخفاضُ الطاقة الكلّيّة[10]. وبسبب إسهامها السلبيّ، فعندما نضيفُ جميع التآثرات التثاقليّة بين النجوم في المجرّات وبين المجرّات نفسها، فإن طاقتنا الكلية الأصليّة الهائلةَ تنقصُ شيئاً فشيئاً.

تُرى، هل تَفْنَى هذه الطاقَةُ كلّيًّا؟ وهل تبدأ بفعل ما يشبه ذلك؟ يمكننا الحكم على الطاقة الكلّيّة الصّافية للكونِ بفحصِ معدّلِ تمدّدهِ (وهذا الموضوعُ مطروقٌ بتفصيلٍ أوسعَ في الفصل 8). فإذا فاق التأثّرُ التثاقليُّ السلبيُّ الإسهامَ الإيجابيَّ للكتلةِ، فإن المستقبَلَ الطويلَ الأمد للعالَمِ سيشهد تباطؤَ التمدّدِ، ثُمَّ ينعكس، وأخيراً ينهار العالَمُ على نفسه حين قيام السّاعةِ. وهذا يشبه قذفَ كرةٍ نحو الأعلى في الهواءِ بطاقةٍ حركيّةٍ جدّ منخفضةٍ، إذْ إنّ ما يحدث بعد ذلك هو أنّ الثقالةَ الأرضيّةَ ستسحبها ثانيةً إلى الأرض (الشكل 3-12). وذلك المستقبَلُ السّابقُ الذِّكْرِ، يُظَنُّ على نحو متزايد أنه غيرُ محتملٍ. ومن ناحيةٍ أخرى، إذا كان التجاذبُ التثاقليُّ ضعيفاً، فإن الكوْنَ سيتوسّع إلى الأبد. وهذا يشبه قذفَ كرةٍ إلى الأعلى بقدْرٍ هائلٍ من الطّاقةِ الحركيّةِ تسمحُ لها بالإفلاتِ من سَحْبِ الثقالة

(10) إن طاقة التجاذب بين الشمس والأرض تُسهم في انتزاع -5.3×10^{33} جول إلى المجموع، لذا فإن الطاقة الكامنة التثاقلية الكلّيّة ليستْ قابلةً للإهمال أبداً، حتى لو كانت الثقالة نفسُها ضعيفةً.



الشكل 3-12 ـ تشير المسارات من الكرةِ إلى ما يحدث عندما نقذف كرةً إلى الأعلى على سطح الأرض. فإذا رميناها نحو الأعلى برفقٍ نسبيًّا (بسرعةٍ أدنى من سرعة إفلاتها)، فهي تعود إلى الأرض ثانيةً. وإذا قذفناها بعنفٍ (بأعلى من سرعةِ إفلاتها) فإنها تفرّ إلى اللانهاية، وتتابع حركتَها مع اقترابها من اللاّنهاية. ويشير المسارُ المنقَّط إلى ما يحدث عندما نقذفها بسرعةِ الإفلات بالضّبطِ: إنها تنفلتُ، لكنها تتوقف عن الحركة مع اقترابها من اللانهاية. الخطّ المنقّطُ هو الخط الفاصل بين الإفلات والجذب. ويبيّن الخطّ البيانيُّ كيف تنطبق هذه الفكرة على الكون ككلٍّ. فإذا كانت الثقالة قويةً (بسبب وجود قدْرٍ كبيرٍ من المادةِ في الكون)، فسينهار الكونُ في وقتٍ ما في المستقبل (مثل كرةٍ قُذفتْ إلى الأعلى وعادتْ ثانيةً). وإذا كانت الثقالةُ ضعيفةً جدًّا (بسبب عدم وجود كثيرٍ من المادة في الكون)، فإن مقياسَ الكوْنِ سيتزايدُ أبداً (مثل كرةٍ قُذفتْ إلى الأعلى وظلّتْ تتحرّك أبداً). وإذا كانت الثقالةُ والحركةُ الخارجيّةُ في توازنٍ تامٍّ، فإنَّ الكوْنَ سيتحدّدُ أبداً، ثمّ يتوقّف تماماً (مثل كرةٍ قُذفتْ بسرعةِ الإفلاتِ).

والتوجُّهِ بسرعةٍ إلى الفضاء بين المجران intergallactic والبقاء في حالةِ حركةٍ مع اقترابها من اللانهاية. ويظلّ هذا مستقبَلاً ممكناً: فالأرصاد لم تستبعدْهُ.

وإذا كان الإسهامان السلبيُّ والإيجابيُّ في الطاقة متساوييْن تماماً، فإنّ الكوْنَ سيتوسّع أيضاً أبداً، لكن توسّعه يصبحُ أبطأ فأبطأ مع كِبَرِهِ تدريجيًّا، ويمكننا عندئذٍ في المستقبل البعيد التفكيرُ في العالَمِ بأنه يتأرجح بين التوسّع المستمرّ والانهيار. وهذا يشبه رَمْيَ كرةٍ نحو الأعلى بسرعةِ الإفلاتِ الصحيحةِ

تماماً، ومن ثَمَّ يكونُ لها ما يكفي من الطاقة الحركيّة للإفلات، لكنها خلال اقترابها من اللانهاية، تكون قد تباطأت لتصل إلى التوقّف التّام[11]. ولأن مِثْلَ هذه الكرةِ ليستْ متحركةً، فطاقتها الحركيّةُ صفريّة. ونظراً إلى كونها بعيدةً بلا تناهٍ عن الأرض، وخارجَ نطاق ثقالتها، فإن طاقتَهَا الكامنةَ صِفْرِيَّةٌ، ومن ثَمَّ فطاقتُها الكلّيّة صفريّةٌ. وبسبب كون الطاقةِ منحفظةً، فبرغم أن لها كميات متغيرةً من الطاقتيْن الحركيّةِ والكامنةِ، فإن الطاقةَ الكلّيَّة للكرةِ لا بدّ أنها كانت صفراً منذ البدء. هذه عواملُ مُعَقَّدَةٌ ترتبط بالتأثيراتِ الإضافيةِ المحتملةِ التي تؤدّي إلى تسارعِ الكون خلال توسعه (انظر الفصل 8)، لكنْ هذا يبدو وكأنّ الطاقةَ الكلّيَة للكون قريبةٌ جدًّا في الواقع من الصّفر. وفي الحقيقة، فقد تكون مساويةً للصفر بالضبط. وإذا تبيَّن أنّ هذا هو الحال، فإنه يبدو وكأن اللَّهَ لمْ يزوِّد الكونَ عند خلقه بما يكفي من الطّاقة.

وينشأ الانطباع المضلِّلُ بأن ثمّةَ مقاديرَ كبيرةً من الطاقةِ في الكونِ من أننا نرى العلاماتِ المرئيّةَ للطاقةِ بشكلٍ واحدٍ (كالمادة والتّوهج الحراريّ للنجوم)، لكننا نتجاهل الطاقةَ بأشكالها الأخرى (التثاقل). هذا التمييز في الطاقة، لا الطاقة الكلية، هو الذي يمنحُ الكونَ هذه الديناميّةَ المثيرةَ للإعجاب.

لكلِّ قطعة نقديَّةٍ وجه آخر. ولانحفاظِ الطاقةِ، وهو القانونُ الذي يبدو أنه خالٍ تماماً من الاستثناءاتِ، استثناءاتٌ. فالميكانيك الكوانتيّ (الكموميّ) يقوّضُ ثقتَنا بأنفسِنا بعددٍ من الطرائقِ. فأحد الاقتضاءاتِ الغريبةِ الكثيرةِ للميكانيكِ الكوانتيِّ (الفصل 7) هو أنّ الطاقةَ يُمكنُ أن يكون لها قيمةٌ محدَّدةٌ في تلك الحالةِ فقط التي تُواصل فيها الطاقةُ البقاءَ على وضعها إلى الأبد. وطبقاً للميكانيك الكوانتيِّ، فالجسيم، الذي له وجودٌ سريعُ الزّوالِ، لا يملكُ طاقةً محدَّدةً، وفي لحظاتٍ قصيرةِ الأمد من الزّمنِ، لا يُمكنُ أن تُمْنَحَ طاقةُ الكونِ قيمةً محدَّدةً، ومن ثَمَّ فإنَّ طاقتَهُ ليست منحفظةً بالضرورة. وربّما يغدو بالإمكان إنشاء آلاتٍ للحركة الدائمة تُعَمِّرُ أمداً قصيراً بعد كلّ ذلك!

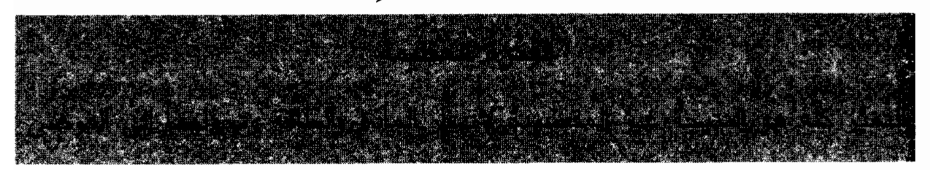
(11) سرعة الإفلات على الأرض تساوي 11 كم/ثا، وهي نفسها لأي جسم أياً كانت كتلته.



الفصل 4

الإنْتْرُوبِيا

حيوية التَّغَيُّرِ



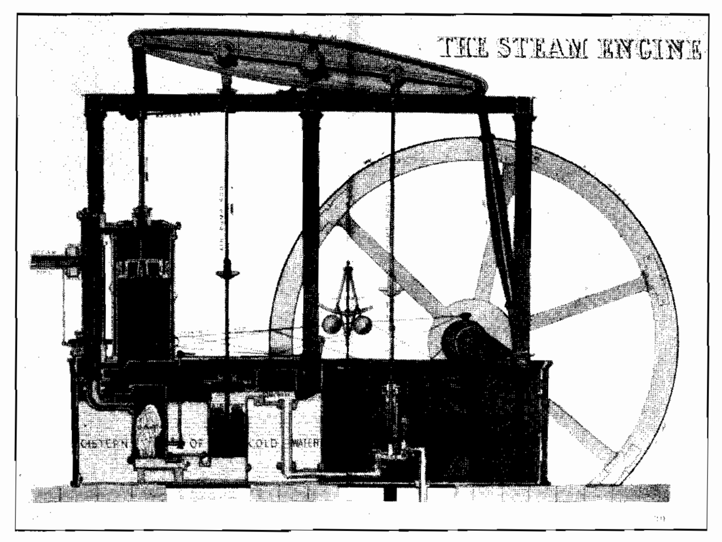
عدمُ معرفة القانون الثاني في علم الترموديناميك (التحريك الحراري)
شبيهٌ بعدم قراءة أيِّ إبداعٍ لشكسبير[1]
تشارلز سْنو

ثمة سؤالٌ قد يَنسى طرحَه أيُّ شخصٍ؛ هو: ما السبب في حدوث أي شيء مهما كان؟ غالباً ما يُظَنّ خطأً أن الأسئلةَ العميقة هي أسئلةٌ ساذَجَةٌ؛ بَيْدَ أنّ الأسئلة العميقة، الساذجة ظاهرياً، التي تُعالَجُ معالجةً جيدةً، يمكن أن تشغل موقع القلب من العالَمِ. وهذا يصحّ قطعاً في أول سؤال طرحناه، لأننا سنرى أن محاولة الحصول على جوابه يقودنا إلى فهمٍ كاملٍ للقوةِ الدافعة للتغيّر في العالَم. وسنتوصل إلى فهم الأحداث البسيطة التي تجري في حياتنا اليومية، مثل تبريد كوبٍ من القهوة الساخنة، وسنرى تفسيراً لمعظم الأحداث المعقّدة في حياتنا اليومية، كالولادة، والنموّ، والموت.

إن الجواب عن سؤالنا المتعلق بأصل التغيّر يقع في مجال العِلْمِ الذي يُسمَّى الترموديناميك (التحريك الحراري) thermodynamics، والذي يَدْرُسُ تحوّلاتِ الطاقةِ، وبخاصةٍ الطاقة الحرارية، إلى العمل. ومعروفٌ عن الترموديناميك أنه علم لا يخلو من بعض الصعوبات التي تواجهه، لأن استيعابه يتطلّب العودةَ

(1) اقتباس من كتاب The two cultures.

إلى أصوله، وتفحُّصَ فعاليّاتِ المحرّكاتِ البخاريّةِ. ترمز هذه المحرّكاتُ إلى ثقلِ الصناعة، وتوسيعِ نطاق الاضطهادِ والعبءِ الاجتماعيِّ اللذيْن فرضهما التصنيع (الشكل 4-1). إنها تمثل القذارةَ بدلاً من النظافة، والمدينةَ بدلاً من الريف، والثقلَ بدلاً من الخفَّةِ والرشاقةِ. كيف يمكنْ أن يكون لهذه الآلاتِ الضخمةِ التي تُصْدِرُ الصَّليلَ والأزيرَ والضجيجَ والصفيرَ المزعجَ، علاقةٌ بفهمنا لمجموعة الأحداث الدّقيقة التي تحيط بنا، وبإغنائنا، وبالتدخل في كلِّ سِمَةٍ من سمات هذا العالم الرائع؟



الشكل 4-1. قد يبدو المحرك البخاري ثقيلاً وغليظاً، لكنه يمثل النشاطات التي تجري في العالم بصورةٍ مصغَّرةٍ. وسنرى في هذا الفصل أنه عند التعبير عن جميع الأحداث التي تأخذ مجراها في العالم بطريقة مواتية، فإن داخلنا وخارجنا كلهما مدفوعان بمحركات بخارية.

بدأْنا نرى كيف أنّ العلمَ ينير العالم عن طريق انتهاجه المتزايد للتجريد. وهنا سنفعل هذا أيضاً. فعندما نصل إلى تجريدٍ للمحرّك البخاريّ بنزعِ الحديدِ من مكوّناتِه، فإننا نحصل على تمثيلٍ لينبوع التغير كله. نعني بهذا أنه إذا اقتصرنا على جوهر المحرّك البخاريّ، وقلبِهِ المجرّدِ، وتجاهلْنَا تفصيلاتِ تحقيقه ـ البخار، الأنابيب التي تتسرب منها السوائل، قطرات الزيت والشحم، صوت الخشخشاتِ والقعقعاتِ، الضجيج العالي، المسامير الملولبة ـ فإننا نتوصل إلى

مفهومٍ ينطبق على سلسلة جميع الأحداث. هكذا العِلْمُ، فهو يستخلص من الحقيقة جوهرها، وأفكارها العظيمة، ثم يعثر على نفس الروح التجريدية في مكانٍ آخر من الطبيعة. إنّ تَعَرُّفَ نفسِ الرُّوحِ، التي تُؤوي أحداثاً مختلفةً، يعني أننا نكتسب فهماً عامًّا للعالم. وبعينيْ شاعرٍ، نرى الأقسام السطحية من الأحداث، وهذا لا يعني أن الأحداث ليست مثيرةً عاطفيًّا أو روحيًّا أبداً، بيد أنه إذا نظرنا بعينيْ عالِمٍ، فإننا نخترق السطحَ لنرى الرّوحَ داخله. وسنقوم في هذا الفصل بإزالة القشور عن جلد الأحداث لبلوغ روح المحرّك البخاري تحت هذه القشور.

●

برز الإدراك بأن المحرّكَ البخاريَّ أعطى صورةً مصغرةً لجميع التغيرات، في القرن التاسع عشر، وبلغ ذروته في بواكير القرن العشرين. وهذه مشكلة أخرى تتعلّق بالترموديناميك: الذي له عبيرٌ فكتوريٌّ، ولما كان الحال في ذلك العصر، ربما يُظَنُّ أن الترموديناميكَ موضوعٌ من الماضي، وأنه، باستثناء المهندسين، لا يملك علاقةً وطيدةً بفهم الناس للعالم الجديد. لكنّ جذور الترموديناميك تمتدّ عميقاً في بنيةِ العالَمِ الجديدِ، وإذا أردنا تفسيرَ الترموديناميكِ بطريقةٍ معاصرةٍ، فإننا نقول إن تشعّباته تصل إلى معظم الفروع العلمية.

ولرؤية المشهد بوضوح أعلى، سأثيرُ مياهَ بركةِ تاريخِ القرنِ التاسعَ عشرَ، ليطفو على سطحها عقول أربعةٍ من العلماءِ الرّاحلين. هؤلاء الأربعة ـ سادي كارنو S. Carnot، وليام طومسون W. Thomson (لورد كلڤن)، رودلف كلاوزيوس R. Clausius، لودفيك بولتزمان L. Boltzmann ـ قدّموا إسهاماتٍ مشهودةً ساعدت على التوصّل إلى جوهر المحرّك البخاريّ. سنتعقّبُ بروز فكرة «الإنتروبيا» entropy العظيمة، وهي مفهومٌ يكمن في قلب هذا العرْضِ، وذلك كما رآه هؤلاء العلماء، وقبل معالجة هذا المفهوم من وجهة نظرٍ أحدث.

في أوائلِ القرنِ التاسعَ عشرَ، كان المحرّكُ البخاريُّ يمثل رمزاً لامتلاك الثروة، وسنرى في وقت لاحق أنه مثّل أيضاً نموذجاً للتغيّر، لكننا سنتوقّف

قليلاً عند الثروة المرتبطة به إن إنكلترا، التي انتشرت محركاتها البخارية في طول البلاد وعرضها، وزادت من فعالية المناجم، وعزّزت إنتاج الأنوال، كل ذلك أدى إلى إنعاش الاقتصاد، وسرّع استعمالَ القاطرات البخارية وعزز تسهيلات نقل الإنتاج، والدفاع، والجرأة على الاعتداء. كانت هذه المحرّكاتُ البخاريّةُ تنتشر هناك وتُحَوِّلُ البنيةَ الاجتماعيّةَ والاقتصاديَة للبلاد، كما فعل الحاسوب بعد ذلك بقرنٍ أو نحوه من الزمان. كانت عيون الفرنسيين تراقب كلَّ ذلك عبر القنال (بحر المانش)، وبدا أنهم عاجزون عن تقليد الإنكليز بسبب عدم قدرتهم على الحصول على الفحم الحجري. كان ما يهدف إليه المهندسون هو تعزيز فعاليّة المحرّك البخاريّ، بغية الحصول على عملٍ أكثر بفحمٍ أقل. تُرى، هل كان استعمال الماء أفضلَ وسيلةٍ لذلك، أمْ أنه كان استعمال الهواء؟ هل كان الضغط العالي أفضل من المنخفض؟ وماذا عن الحرارة؟ هل بمقدور الفرنسيين استعمالُ عقلهم التحليليِّ النظريِّ لتجاوز الإنكيز الذرائعيّين (البراغماتيين)؟

ما حدث هو أن ضوءًا سَطَعَ عبر الغيوم المتلبّدة التي كانت تحجب الأجوبة عن الأسئلة السابقة. لقد وُلِدَ أخيراً سَادِي كارنو عام 1796. أقول «أخيراً»، لأنّ أبويْهِ المصمّمَيْن على الإنجاب، وَلَدَا قبله طفليْن وسمّيَاهما باسمه «سادي» ـ لكن لم تُكتَبْ لهما الحياة إذ ماتا صغيري السن. لكنّ محاولتهما الثالثة نجحت أخيراً بإنجاب سادي الذي عاش مدةً أطول من أخويه، إلى أن أُصيب بالكوليرا ورحل ولمّا يَزَلْ في السادسة والثلاثين من عمره. ومع أنّ حياته كانت قصيرة، فقد كانت المدة التي عاشها، والتي تقل عن أربعة عقود، كافيةً لتخليد اسمه نتيجة الإسهامات الرائعة التي قدّمها للعلم.

كان كارنو مخطئاً أساساً في فهمه للمحرّك البخاريّ، لكنّ قوّة جوهر المحرّك البخاريّ الذي فهمه كانت عاليةً إلى درجةٍ أنّها ظهرت حتى في سوء فهمه الأساسيّ. لقد آمن كارنو (على الأقل في صوغه الأصلي لأفكاره، مع أنه غيّر أفكاره في وقت لاحق) بصحة النظرة التي كانت سائدةً آنذاك، والتي قابلناها في الفصل 3، وهي أن الحرارة مائع يتدفّق من مستودعٍ حارٍّ إلى بالوعةٍ باردةٍ، وخلال هذه العملية، قد يدير محركاً، مثلما تدوِّر النواعير بتدفّق الماء. وقد اعتَبَرَ

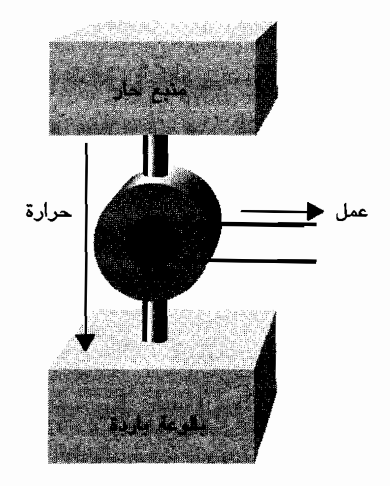
- أيضاً وفقاً للأفكار السائدة في ذلك الوقت - أنه بسبب كون الحرارة مائعاً، فهي لا تولَّدُ ولا تدمَّرُ خلال انسيابها من المنبع إلى البالوعة. وبناءً على هذا النموذج الخاطئ، تمكّن من التوصّل إلى نتيجة مذهلة مفادها أن فعاليّةَ محرّكٍ بخاريٍّ مثاليٍّ - يتجاهل آثارَ الاحتكاك وتسرّبَ الزيتِ والماءِ،... - لا تتعيّن إلاّ بدرجاتِ حرارةِ المنبعِ الحارِّ والبالوعة الباردة، وهذا مستقل عن كلٍّ من الضغط والمادة العاملة[2]. وهكذا فلإنجاز أعلى فعالية، يجب أن يكون المستودع حارًّا قدر الإمكان، ويجب أن تكون البالوعة الباردة باردةً قدر الإمكان. هذا ولا يوجد في المتغيرات الأخرى جميعاً، علاقة بهذا الموضوع.

كان مهندسو تلك الأيام يظُنُّون أن هذه النتائجَ المخالفَةَ للحدس والبديهة سخيفةٌ، ومن ثَمّ فإن كتاب كارنو الصغير بعنوان تأملات في القوة المحركة للنار Réflections sur la puissance motrice du feu (1824) لم يُقْرأ عموماً، وطُوِيَ في غياهب النسيان، لكنْ ليس تماماً. فالخيوط الرّفيعة التي تُبقِي الأفكارَ العظيمةَ حيّةً عبر التاريخ وَضَعَتْ كتابَ كارنو بين يدي وليام طومسون (1824-1907)، الذي صار فيما بعد لورد كلڤن. وكما رأينا في الفصل 3 فإن لورد كلڤن، الذي يستحق هذا اللقب، أسهم، بمشاركة جيمس جول J. Joule، في إسقاط النظرية الحرارية المسماة caloric theory، وعرّف الحرارة بوصفها شكلاً من أشكال الطاقة. وقد توصّل العالَمُ المعاصِرُ إلى تعرّف أن الطاقة، وليس الحرارة، منحفظةٌ، وأن الحرارة والعمل، لكونهما مظهريْن للطاقة، يمكن تحويل بعضهما إلى بعض. إن مفهوم تدفّق الكالوريك (المائع الحراري) caloric عبر محرك، أفسح المجال إلى مفهومٍ مفاده أن هذا التدفق كان للطاقة، وأن المحرك نفسه ليس سوى جهاز لتحويل بعض تلك الطاقة من الحرارة إلى عمل. ويظل هذا مبدأ كل ما نسميه المحركاتِ الحراريّةَ heat engines، وهي تجهيزات لتحويل الحرارة إلى عمل، وتضمّ المحركاتِ البخاريّةَ، والعنفاتِ البخاريةَ، والمحركاتِ النفاثةَ، ومحركاتِ الاحتراقِ الداخليِّ.

(2) فعاليةُ محركٍ كاملٍ - نسبة العملِ المنجَزِ إلى حرارة المصدر - يعمل بين درجتي الحرارة T_{hot} وT_{cold}، حيث تقاس درجتا الحرارة هاتان بمقياس الحرارة الترموديناميي، تساوي $1 - T_{cold} / T_{hot}$.

لقد حرّض كتابُ كارنو السابق الذكر كلڤن على الاهتمام بفعاليةِ المحركاتِ البخاريّةِ، وتقديمِ عملِ كارنو بطابَعٍ كَمِّيٍّ، وكان كارنو توصّل إلى أفكاره عن طريق استعمال علم الحساب البسيط، ولم يسلك أسلوباً رياضيًّا صارمَ الدِّقَّةِ للتعبير عن أفكاره بأسلوبٍ أكثر حداثةً.

لفهم إسهام كلڤن، يمكننا تصوُّر أننا نقف في مقدمة محرّك بخاريّ نموذجيّ للقرن التاسع عشر. إن القيام بفحص سريع للمحرك ربما يوصلنا إلى نتيجة مفادها أن المكبسَ في أسطوانته هو المركِّبةُ الأساسيةُ للمحرك، لأنه الجهازُ الذي يُحْدِثُ تدفقَ الطاقةِ ويحوّلُ قسماً منها إلى حركةٍ، ومن ثَمَّ إلى عملٍ (الشكل 4-2). وبطريقةٍ أخرى، ربّما نستخلصُ أنّ المستودعَ reservoir هو المركِّبةُ الأساسيةُ، لأنه منبع الطاقة التي يجري تحويلُها إلى عملٍ. بَيْدَ أنّ كلڤن قدّم وجهة النظر التي تبدو غريبةً، وهي أنه على الرغم من كون هاتيْن المركِّبتيْن مهمّتيْن وضوحاً، وتتطلّبان تصميماً وإنشاءً قويَّيْن، فإن المركِّبة الأساسيَةَ لمحركٍ بخاريٍّ هي البالوعة الباردة - وهي التي تُطْرَحُ فيها النفاية الحارة. ووفق وجهة النظر هذه، لا يبدو أن القسم الأساسيّ يجب أن يُصَمَّمَ أو يُنْشَأَ، إذ إنه ببساطةٍ محيطُ القِطَعِ التي أنشئت. وغالباً ما يواصل العِلْمُ سَيْرَهُ بهذه الطريقة: إذ إنه يقفز إلى الأمام عن طريق إنارة مسألةٍ قديمةٍ بضوءٍ يَصْدُرُ من جهة جديدة. وقد

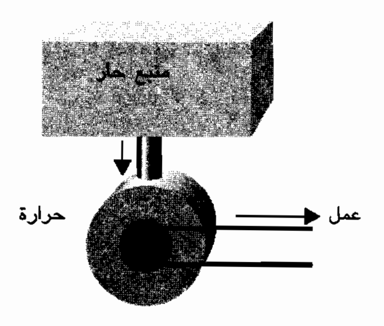


الشكل 4-2. هذا النوع من المخططات هو الذي سنعتمده لتمثيل محركٍ بخاريٍّ - وبوجهٍ أعمّ، محركٍ حراريٍّ. ثمة منبع حار تُسْتَجَرُّ منه الطاقةُ بدرجةِ حرارةٍ عاليةٍ، وهوجهازٌ لتحويل الحرارة إلى عملٍ (في محركٍ بخاريٍّ حقيقيٍّ يقع المكبس في أسطوانته)، وبالوعة تُطرَح فيها «نفاية» الحرارة.

عبّر عالم الكيمياء الحيوية الهنغاري ألبرت زنت ـ كيوركي A. S- György (1893-1986) عن هذه السّمة التي تَطْبَعُ العِلْمَ بأسلوبٍ رائعٍ إذ قال إن البحثَ العلميَّ مبنيٌّ على رؤية ما رآه كل الناس، لكن الباحث الحقيقي يفكر فيما لم يفكر فيه أحد غيره.

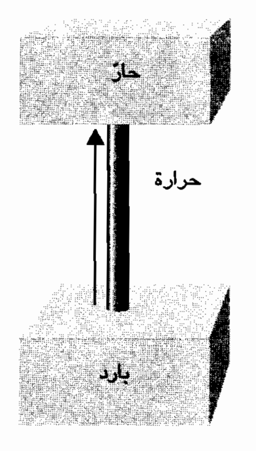
قاد هذا الانقلابُ المفاهيميُّ التامُّ كلفن إلى ترويجه للدّور المركزيّ للبالوعة الباردة باعتباره مبدأً عامًّا للطبيعة. المبدأ هو: لكل المحركات القابلة للتطبيق viable بالوعة باردة (الشكل 4-3)[3]. لم يعبِّر كلفن عن مبدئه بهذه الكلمات بالضبط، لكنها جوهر ما أراد قولَهُ. وإذا نظرتَ حولَكَ، وفحصتَ أيَّ محركٍ بخاريٍّ، وجدتَ أنّ لكل محرّكٍ بمفرده بالوعةً باردةً. فإذا استبعدتَ البالوعَةَ البارِدَة توقّف المحركُ عن العمل، مع أنه ما يزال يوجد قدر كبير من الطاقة مختزنٌ في المستودع الحار، ومع أن ثمة مكبساً في الأسطوانة مشحَّماً جيّداً مرتبطاً بالمستودع. البالوعة الباردة ضرورية، إذ إن إلغاءَها يُوقِفُ المحرّكَ. وفي الحقيقة، يُمكن تطبيقُ المبدأ على أي نوع آخر من المحرِّكات التي تحوِّل الحرارةَ إلى عملٍ، ومن ضمنها محركاتُ الاحتراق الداخليّ التي تدفع سياراتنا، والمحركاتُ النفاثة التي تجعل الطائرات تحلّق في الجو. من الصعب تعريف البالوعة الباردة بهذه التجهيزات التي هي أكثر تعقيداً، لكنّ إجراء تحليل دقيق لتدفق الطاقة يبيّن أهميةَ وجود البالوعة. فمثلاً، بوسعنا في محرّكِ احتراقٍ داخليٍّ التفكيرُ في مَشْعَبَاتِ وصِمَامَاتِ العوادِمِ exhaust valves and manifold بوصفها بالوعَة لمخلّفات الحرارة المهدورة. وهنا نجد أوّل ومضةٍ للاعتراف بوجود محرّك بخاريّ نظرياً داخلَ كلِّ نوع من المحركات الحرارية، ذلك أن المركّبة الأساسية، وهي البالوعة الباردة، وأنّ الفعلَ الأساسيَّ، وهو طرح الحرارة العديمة النفع، موجودان في كلٍّ من هذه المحرّكات. تُرى، هل يمكن أن تكون العضويّاتُ الحيّةُ، التي هي أعقدُ من محرّكات الاحتراق الداخلي، مبنيّةً على نفس هذه المبادئ المجرّدة؟

(3) وبدقة أعلى، قال: لا يمكن وجود عملية حلقية cyclic تكون فيها النتيجة الوحيدةُ هي امتصاصَ الحرارةِ من مستودعٍ وتحويلها كليًّا إلى عملٍ.



الشكل 4-3. تجزم دعوى كلفن في القانون الثاني أن هذا المحرك لن يعمل. فلكل محرك حراري قابل للتطبيق بالوعة باردة لا بد أن يُهْدَرَ فيها بعض الحرارة.

إن المبدأ الذي سردناه ـ لكلِّ المحرّكاتِ القابلةِ للتطبيقِ بالوعةٌ باردةٌ ـ هو أحد عبارات القانون الثاني في علم الترموديناميك. هذا القانون غيرُ معبَّرٍ عنه بإحكامٍ شديدٍ، لأن هذه الصيغةَ التي أوردناها تعبّر عن جوهره. وفي هذه المرحلة، فإن له الصيغةَ النموذجيةَ لقانونٍ عمليٍّ، قانونٍ يمثل خلاصةً مباشرةً للتجربة: فثمة إمكان للتجريد، لكن القانون بهذه الصيغة ربما استُهِلَّ من قِبَلِ أيِّ مراقبٍ دقيقٍ. وبهذه الصيغة أيضاً، تبدو شمولية القانون مقيّدةً إلى حدٍّ ما. إنه خلاصةٌ لبنية المحرّكات الحراريّة على الأرض، وربما لبنيةِ المحرّكات الحرارية المبنية من قِبَلِ كائناتٍ خارجَ الأرض، إن وُجِدَتْ. لكنْ لا يبدو أنّ القانون يحظى بامتدادٍ واسعٍ يتضمن الحياةَ والكونَ وكلَّ شيء. لكنْ عليكَ بالصبر، ودع الحكاية مستمرة.



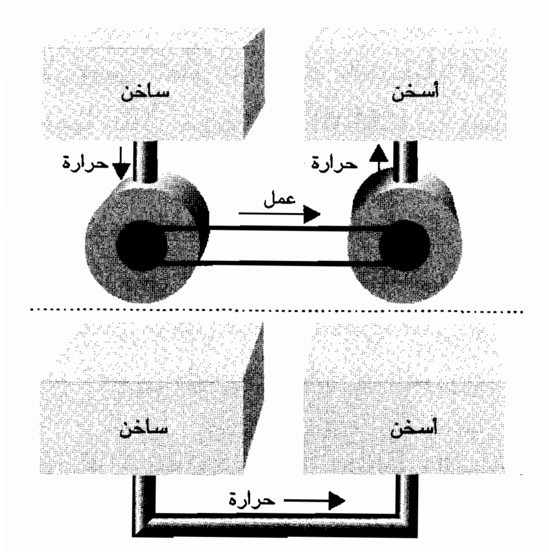
الشكل 4-4. تجزم عبارة كلاوزيوس Clausius للقانون الثاني بأن عملياتٍ مثل هذه لا تلاحَظُ البتة. وإذا اشترطنا عدم وجود تدخّلٍ خارجيٍّ، فلا يمكن إطلاقاً ملاحظة أن الطاقة تنساب كحرارةٍ من جسم باردٍ إلى جسم ساخن.

وفي نفس الوقت تقريباً، وذلك عام 1850، كان الفيزيائيّ الألماني رودلف كلاوزيوس (1822-1888) R.Clausius يعمل أيضاً فيما كان يعدُّ آنذاك موضوعاً ساخناً، هو الحرارة، ونشر تأمّلاتِهِ في بحثٍ عنوانه حول القوّة المحركة للحرارة Über die bewegende kraft der Wärme. لقد لاحظ كلاوزيوس سمةً عامّةً للطبيعةِ، وكان يمتلك صفاتِ عالِمٍ يَجْهَرُ بما يؤمن به، وهذا جعله ينشر الملاحظة التالية التي ربما يظنها آخرون ساذجة: لقد أعلن أن الحرارة لا تنساب من جسمٍ بارد إلى جسمٍ أسخن منه (الشكل 4-4)[4]، وبالطبع، كان كلاوزيوس بعيداً كلَّ البعد عن كونه شخصاً ساذجاً؛ إذ إنه طوّر في هذه النشرة وغيرها هذه الفكرةَ لتصبح مبدأً كمِّيًّا للقوى الكبيرة. ومع ذلك، سنتمسّك حاليًّا بالصيغة التجريبية empirical للقانون، وسنرى أنه ينسجم في الواقع مع تجارب الحياة اليوميّة. ولفعل ذلك، لا بد لنا من الإشارة إلى أن القانون لا يمنعُ انتقالَ الحرارةِ من الأجسام الباردة إلى الحارّة: هذا، في الحقيقة، ما تحققه الثلاجةُ (البرّاد)، الذي يضخُّ حرارةً إلى خارج هيكله لتتوضّع في المنطقة المحيطة به التي تكون أسخن. النقطة هنا هي أنه كي نحصل على التبريد، علينا القيام بعملٍ: فيجب أن يكون البرّادُ متصلاً بمزوّدٍ للتيار الكهربائي يدفع آلية البرّاد إلى العمل. وتنطبق ملاحظة كلاوزيوس على عمليةٍ لا يجري التدخل فيها بأيّ شكلٍ من الأشكال، وهي عمليةٌ يمكن حدوثُها دون أن نُضْطَرَّ إلى دفعها. وخلاصةً، فإن دعوى كلاوزيوس تتعلّق بالتغيرات «الطبيعية» أو «العفوية»، وهي تغيراتٌ تحدث دون أن يدفعها عاملٌ خارجيٌّ. وهكذا فالتبريد، وصولاً إلى درجة حرارة المحيط، تلقائي، لكنّ التسخين إلى درجة تتجاوز درجة حرارة المحيط ليست تلقائية، لأن من الضروري دفعها (وذلك، مثلاً، بإدخال تيار كهربائي في جهازٍ للتسخين يمسّ الجسم). وفي العلم لا يوجد «للتلقائي» تضميناتٌ للسريع: فالتدفق البطيء لقطرانٍ سميك من برميلٍ مقلوبٍ تلقائيٌّ، حتى لو كان يتزايد تباطؤ تدفقه. للتلقائي في العلم تضمين «للطبيعي» فقط لا «للسريع».

(4) كما في السابق، نحن نعيد سبك العبارة الأصلية. وثمة عبارة أقرب إلى ملاحظة كلاوزيوس هي: لا يمكن حدوث عملية حلقية cyclic تكون نتيجتُها الوحيدةُ نقلَ الطاقةِ من جسمٍ باردٍ إلى آخر أسخن منه.

الترموديناميك أمازون Amazon للمفاهيم. وكما هو الحال في نهر الأمازون، فالترموديناميك ملتقًى لكثيرٍ من الروافد. وقد تبيّن أنَّ رافدي كلڤن وكلاوزيوس جزءٌ من نفس نهر الأفكار. وفي الحقيقة رافديهما الفكريين متكافئان منطقياً، لأنه إذا كان من الممكن أن تتدفق الحرارة تلقائياً من البارد إلى الحار، فيمكن لمحرك العمل دون بالوعة باردة؛ وإذا كان بوسعِ محركٍ العملُ بدون بالوعة باردة، فيمكن عندئذٍ للحرارة أن تتدفق تلقائياً من البارد إلى الحار.

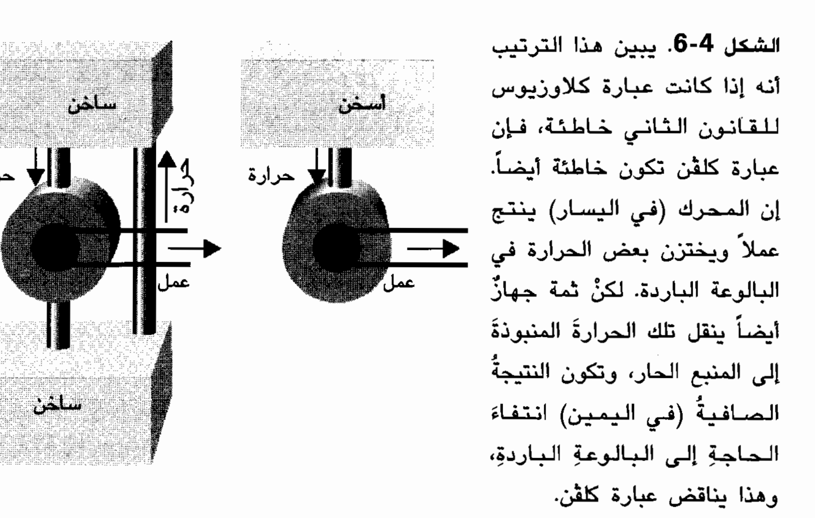
وكي نرى أن عبارتيْ كلڤن وكلاوزيوس متكافئتان حقًّا، سنستعمل محركاً افتراضياً لا يحوي بالوعة لتشغيل محرك افتراضي آخرَ، ليس له بالوعة، بحركةٍ عكسيةٍ (الشكل 4-5). الفرق الوحيد بين المحركيْن هو أنّ درجتي حرارة منبعي طاقتهما مختلفتان، وأن المحركَ الدافعَ موضوعٌ أسفل المحرك المدفوع. وكما نرى في هذا الشكل، فإن النتيجةَ الصافيةَ للترتيب الإجمالي هو نقلُ الطاقة من المنبع الأدنى حرارةً إلى المنبع الأعلى حرارةً، وهذا مناقضٌ لعبارة كلاوزيوس للقانون الثاني. لذا إذا كانت عبارة كلڤن خاطئة، فإن عبارة كلاوزيوس تكون



الشكل 4-5. يبيّن هذا الترتيب (العلوي) أنه إذا كانت عبارة كلڤن للقانون الثاني خاطئة، فإن عبارة كلاوزيوس خاطئة أيضاً. المحرك في اليسار منظّم ليشغّل المحرك الأيمن بحركة عكسية، ومن ثَمَّ يحوّل العمل إلى حرارةٍ يجرى خزنها في المستودع «الأعلى حرارةً». النتيجة الصافية (في الأسفل) هي تحويل الحرارة من المستودع «الساخن» إلى المستودع «الأسخن»، وهذا مناقض لعبارة كلاوزيوس.

كذلك. سنثبت الآن العكس، أي أنه إذا كانت عبارة كلاوزيوس خاطئة، فإن عبارة كلفن تكون أيضاً خاطئة. لهذا الغرض، لنفترض أن المحرك يشتغل، ويطرح الحرارة الفائضة في بالوعة. عندئذٍ نسمح لكل الحرارة الفائضة بالعودة إلى المنبع الساخن، وهذا مناقض لنظرة كلاوزيوس لما يمكن أن يحدث بطريقة طبيعية (الشكل 4-6). النتيجة التالية للترتيب الإجمالي هو تحويل الحرارة من المنبع الساخن إلى عملٍ، دون نبذ أيّ حرارةٍ في البالوعة الباردة، ومن ثَمَّ فلا ضرورة لوجودها هناك. وهذا الاستنتاج مناقض لعبارة كلفن. نستخلص من أنه لمّا كان خطأ كلّ عبارةٍ يقتضي خطأ الأخرى، فإن العبارتين متكافئتان منطقياً حقاً: إذ إنهما عبارتان مكافئتان للقانون الثاني.

إن وجود عبارتين للقانون الثاني شيء غير اقتصادي إلى حدٍّ ما. وعلينا التفكير في أن عبارتي كلفن وكلاوزيوس هما أيضاً سمتان مختلفتان لمفهومٍ واحدٍ، لعبارةٍ واحدةٍ، أكثر تجريداً للقانون. ولكشف النقاب عن هذه العبارة المستترة التي هي أكثر تجريداً، فإننا سنسِيرُ أوَّلَ خطوةٍ باتجاه الإقرار بشمولية المحرك البخاري. وكما رأينا عدة مرات سابقاً، وكما جَزَمْتُ في هذا الفصل، فإن الارتحال إلى التجريد هو جوهر قوة العِلْمِ، لأنه يزيد من مجال العلم ويعزز فهمنا للظواهر الطبيعية.



الشكل 4-6. يبين هذا الترتيب أنه إذا كانت عبارة كلاوزيوس للقانون الثاني خاطئة، فإن عبارة كلفن تكون خاطئة أيضاً. إن المحرك (في اليسار) ينتج عملاً ويختزن بعض الحرارة في البالوعة الباردة. لكنْ ثمة جهازٌ أيضاً ينقل تلك الحرارةَ المنبوذةَ إلى المنبع الحار، وتكون النتيجةُ الصافيةُ (في اليمين) انتفاءَ الحاجةِ إلى البالوعةِ الباردةِ، وهذا يناقض عبارة كلفن.

رأينا في الفصل 3 كيف أصبح مفهومُ الطاقة العملةَ الرئيسية المتداولةَ في علم الفيزياء. وكنّا هناك معنيِّين بكميةِ الطاقةِ، ورأينا أن الظواهر الطبيعية للفيزياء صارت مقبولةً عقليًا بعد إقرار انحفاظ الطاقة. ويقرّ القانونُ الأوّلُ في الترموديناميك بهذا الانحفاظ بتأكيده أن طاقة الكون ثابتة. لا مشكلة لدينا مع هذا القانون في هذا الفصل. لكنه مثلما يمكن لمكتبتيْن أن تحويا نفسَ العدد من الكتب، إحداها بترتيب معين، والأخرى بتكديس الكتب عشوائياً، وهذا يُحْدِثُ تبايناً في جودة الخدمات التي تقدمانها، فإن للطاقة أيضاً وجهاً نوعيًّا يؤثّر في فعاليتها. وتُقَاس جودةُ الطاقة المخزونة بخاصّيَّةٍ جدّ مراوغةٍ، وهي الإنتروبيا entropy. ومع أنني ذكرتُ هنا كلمة «مراوِغَة» elusive، لكننا سنرى بعد وقت غير طويل أن الإنتروبيا مفهومٌ استيعابه أسهل كثيراً من مفهوم الطاقة؛ إن كونَ الطاقة تَخْرج من بين شفتي كلّ شخصٍ في محادثاته اليومية، وكونَ الإنتروبيا نادراً ما نجرؤ على الكلام عنها، هما اللذان يجعلان الطاقةَ صديقاً قديماً، والإنتروبيا تنِّيناً. أحد مقاصد هذا الفصل هو استبعاد الصعوبة المرتبطة باسم الإنتروبيا، ووضع الإنتروبيا في مكانها الصحيح في الممارسات اليومية.

الإنتروبيا هي مقياسٌ لجودة الطاقة، بمعنى أنه كلّما انخفضت الإنتروبيا، ازدادت الجودة. إن للجسم، الذي طاقته مخزونةٌ بطريقةٍ مرتَّبة بدقّةٍ وعنايةٍ ـ مثل ترتيب الكتب في مكتبة عالية المستوَى ـ إنتروبياً منخفضةً. أمّا الجسم الذي طاقته مخزونة بطريقة غير ملائمة، وشَواشِيَّةٍ chaotic ـ مثل الكتب المكدسة عشوائياً ـ فله إنتروبيا عالية. لقد قُدِّمَ مفهومُ الإنتروبيا وحُدِّدَتْ كمِّيًّا بدقةٍ من قِبَل رودلف كلاوزيوس R. Clausius عام 1856 في سياق تطوير عبارته للقانون الثاني. قدّمها بتعريف التغيّر في الإنتروبيا الذي يحدث عندما تنتقل الطاقة إلى نظامٍ كالحرارة[5] مثلاً. وتحديداً كتب ما يلي:

(5) رأينا في الفصل 3 أن الحرارة هي نمطٌ لانتقالِ الطاقةِ يستفيدُ من وجود اختلافٍ في درجات الحرارة. إن التسخين يثيرُ حركةً حراريةً عشوائيةً شواشيةً.

التغيّر في الإنتروبيا = *الطاقة المزوّدة على شكل حرارة* / *درجة الحرارة التي يحدث فيها الانتقال*

وهكذا إذا زوّدنا جسماً بطاقةٍ معيّنة على شكل حرارةٍ بدرجةِ حرارةِ الغرفة، فثمة زيادةٌ في الإنتروبيا يمكننا حسابها بواسطة هذه القاعدة (لاحظ أن درجة الحرارة التي يجب استعمالها في المقام (المخرج) هي بالمقياس المطلق absolute scale). وعند قراءتكَ هذه الجملة، فأنت تولّد حرارةً تنتشر في محيطكَ، لذا فإنك تزيد أنتروبيته[6]. وإذا زَوَّدْتَ بهذهِ الكميةِ من الطاقةِ على شكل حرارةٍ نفسَ الجسم بدرجةِ حرارةٍ أخفض، فإن التغير في الإنتروبيا يكون أكبر. وإذا غادرت الطاقةُ جسماً على شكلِ حرارةٍ، فإن «الطاقةَ المزودةَ على شكل حرارةٍ» تكون سالبة، لذا يكون التغير في الإنتروبيا سالباً. أي أن إنتروبيا الجسم تتناقص عندما يضيِّع طاقةً على شكل حرارة، مثل تبريد كوبٍ من القهوة. لاحظ أن التغيّر في الإنتروبيا يحدَّدُ بالطاقة المنقولة على شكل حرارةٍ، لا بأي طاقة منقولةٍ على شكل عملٍ. والعملُ نفسُه لا يولّد إنتروبيا ولا يخفضها.

وقبل أن أفتح الستار كي أبيّن لك ما هي الإنتروبيا في الحقيقة، سنرى ما إذا كان المفهومُ يوحِّد فعلاً القانونين اللذين اقترحهما كلڤن وكلاوزيوس. لقد اقترح كلاوزيوس أن من الممكن إيواء كلا القانونين تحت سقف واحد بالقول إن الإنتروبيا لا تتناقص البتة[7]. لننظر أولاً في عبارة كلڤن، التي تعادل قولنا «إن محرككَ لن يعملَ إلاّ إذا هَدَرْتَ بعض الطاقة»، وذلك عندما يُعَبَّرُ عنها بدلالة التغيرات في الإنتروبيا. لنفترض أننا ندّعي بأننا اخترعنا محركاً يُستعملُ كلَّ الحرارة ولا يحتاج إلى بالوعةٍ باردة. عندئذٍ سيقول كلاوزيوس ما يلي:

لقد أزلْتَ حرارةً من المنبع الحارّ، لذا فإن إنتروبيا المستودع انخفضتْ. كلُّ الحرارة تحوّلت إلى عملٍ بواسطة الآلات، لذا فإن الطاقة تدخل في المحيط

(6) أنت تكافيء مصباحاً كهربائيًّا استطاعته 100 واط، لذا فإنك تحرِّرُ طاقةً (نتيجةَ استهلاكك للطعام) تعادل قرابةَ 100 جول في الثانية. فإذا كانت درجة حرارة محيطكَ 20° مئوية (أي 293 كلڤن)، فإنك تولّد إنتروبيا بمعدل 0.3 جول لكل كلڤن في الثانية.

(7) وبعبارة أخرى: إن إنتروبيا نظام منعزل تتزايد عند أي تغير تلقائي.

على شكل عملٍ. لكن العمل لا يغيّر الإنتروبيا، لذا فالنتيجةُ الصافيةُ هي تناقصُ إنتروبيا المنبع الحارّ. ووفقاً لتعبيري الخاص، فالإنتروبيا لا تتناقص أبداً. لذا فإن محركَكَ لن يعمل، كما ذكر كلفن تماماً.

لننظر الآن في العبارة الأصلية لكلاوزيوس، وهي التي تتعلق بالحرارة التي لا تتدفّق من البارد إلى الحار. لنفترض أننا ندّعي أننا لاحظنا حرارةً تتدفق بالاتجاه الخاطئ، مثل العثور على جليد يتكوّن في كأسٍ من الماء في فرن. عندئذٍ سيقول كلاوزيوس ما يلي:

تَرَكَتِ الطاقةُ الجسمَ الباردَ (الماء في الكأس) على شكل حرارةٍ، لذا انخفضت إنتروبياتُها. ولما كانت درجةُ الحرارة منخفضةً، وكانت درجةُ الحرارة موجودة في مقام (مخرج) تعبيري عن التغير في الإنتروبيا، فإن الانخفاض في الإنتروبيا كبير. تدخل نفس الطاقة المنطقةَ الحارّةَ (القسم الداخليّ من الفرن)، لذا تتزايدُ إنتروبيا المنطقة. لكن لما كانت درجة حرارتها عالية، فإن هذه الزيادة في الإنتروبيا صغيرة. النتيجةُ الصافية هي مجموعٌ لزيادةٍ ضئيلةٍ ونقصانٍ كبيرٍ، وهذا يولد بالنتيجة نقصاناً. ووفقاً لعبارتي، لا تنقصُ الإنتروبيا أبداً، لذا لا يمكن أن تتدفّق الحرارةُ تلقائيًّا من البارد إلى الحار، كما سبق وذكرتُ آنفاً.

نرى أن لدرجة التجريد، الممثلة في تقديم كلاوزيوس للإنتروبيا، قوانينَ تجريبيّةً يبدو ظاهريًّا أنها حَدّدتْ سمتيْن مختلفتيْن للعالَم: فعبارة القانون الثاني بدلالة الإنتروبيا، تشبه مكعباً بسيطاً. يدورُ ليظهرَ على شكل مربعٍ، وهذا يمثل عبارة كلفن، أو على شكل مسدّسٍ، وهذا يمثل عبارة كلاوزيوس. إن عبارة كلاوزيوس التي فحواها أن الإنتروبيا لن تتناقص البتة هي ملخَّصٌ مُحْكَمٌ للتجربة، وهي أكثر تعقيداً وتجريداً من القانون الثاني. وقد قام كلاوزيوس نفسه بوصف الحالة الترموديناميّة للعالَمِ في عبارتين شهيرتين تُلخصان القانونين الأول والثاني هما:

Der Energie der Welt ist konstat; die Entropy der Welt strebt einem Maximum zu

أي أن: طاقة العالَمِ ثابتة؛ وتسعى الإنتروبيا لبلوغ قمةٍ عظمى.

حدثت معارضة شديدةٌ حين جرى التعبير أولَ مرةٍ عن القانون الثاني بدلالة الإنتروبيا، لأنه أزعجَ حساسيّاتِ ذلك العصر: فقد كان من السهل قبولُ أنّ طاقة الكون ثابتةٌ (لأن الطاقة كانت تُفهم في البداية بوصفها هبةً مقدسةً، لا يستطيع أيُّ عبثٍ بشريٍّ زيادتَها أو إنقاصها)، إذ كيف يمكن لشيء أن تزداد كميته؟ ومن أين تأتي هذه الزيادة؟ من، أو ماذا، بإمكانه إضافة إنتروبيا إلى العالم، وهذه عملية تؤدي إلى تسريع التغير التلقائي؟ هكذا كانت الروح الغريبة للقانون الذي أدّى إلى بذل جهود جبارة في البحث عن أمثلة عكسية، لكنْ دون جدوى. لم يوجد قطّ استثناء للقانون الثاني، حيثما جرى تطبيقه، إنه يطبَّق للتنبؤ بتلقائية بالعملياتِ الفيزيائيةِ البسيطةِ، مثل تبريدِ الأجسامِ الحارّةِ لتبلغ درجةَ حرارةِ محيطِهَا (ولحذف العمليةِ العكسيّةِ بوصفها غير طبيعية)، والتمدّد التلقائيِّ للغازات في الحجم المتاح (وحذف العكس). يُستعمَلُ القانونُ أيضاً للتنبؤ بما إذا كان تفاعلٌ كيميائيٌّ سيجري باتجاه ما أو اتجاهٍ آخر، كأن نحكم ما إذا كان من الممكن استعمالُ الكربون لتخفيض معدنٍ خامٍ (مثلما يُستعمل للحديد)، أو ما إذا كان يتعيّن استعمال التحليل الكهربائي بدلاً منه (كما في الألومنيوم). إنه ينطبق على الشبكة الدقيقة للتفاعلات الكيميائية الحيوية التي تكوّن الخاصيّةَ المعقّدَة لمادةٍ نسميها الحياةَ. ما من شيءٍ لا يصل إليه القانونُ الثاني، ولم يحدث أنه أخفق في أيِّ مكانٍ قطّ؛ إنه يُعَدُّ الآن صخرةً للاستقرار المطلق تحظى بشرعيةٍ شاملةٍ سرمديّةٍ.

لكنْ ما الذي يعنيه هذا؟ ما هو ذلك الشيء الذي نسميه إنتروبيا، وما الذي يعنيه حقًّا عجزه عن التناقص؟ ما هي الأهمية الفيزيائية للإنتروبيا؟ كيف يمكننا إضفاءُ صفةٍ ذاتيةٍ على مفهومها والتفكيرُ فيها بوصفها صديقة لنا؟ إن القانون الثاني يلخّص بإحكامٍ بيئاتِ العالَمِ باعتبارها مجسّدةً في عبارتي كلڤن وكلاوزيوس، ويوفّر وسيلةً كي نقيِّم كمِّيًّا ما إذا كانت عمليةٌ تلقائيةً أم لا. ومع ذلك، فهو مدخل للفهم لا لتقديم إيضاحاتٍ نهائيةٍ. يجب علينا أن ندفع الباب، ونفتحه، ونرى فيزيائياً ما الذي يدفع العالَمَ باتجاهٍ

دون آخر. وبعبارة أخرى، ما الذي يكمن وراء الإنتروبيا، وما هي البنية الجزئية العميقة للقانون الثاني؟

●

إن الباب الذي نقوم الآن بدفعه ينفتح على الأساس الجزيئي للمادة. وحين ندخل إلى هذا العالَم، نرى موادَّ صلبةً مؤلفةً من ذرّاتٍ أو جزيئاتٍ، أو أيوناتٍ (ذرات مشحونة) بعضها فوق بعض، كلٌّ منها يتحرّك قليلاً حول موقعه الوَسَطِيّ. ونرى موائعَ مؤلفةً من جزيئاتٍ يتصادم بعضها ببعض، لا عندما يتدفق المائع فحسب، بل أيضاً عندما تبدو ظاهرياً هامدة في مستنقع لا حياة فيه. ونرى غازاتٍ مؤلفةً من جزيئاتٍ متطايرةٍ ومتصادمةٍ، ومرتدٌّ بعضها عن بعض، ومتحركةٍ مسافاتٍ بعيدةً بسرعةٍ تبدو عشوائيةً. هذا هو العالَمُ الذي يكمن فيه تفسير الإنتروبيا، والذي يمكننا البدء منه لنشهد كيف أن التغيّر يرافَقُ بزيادتها.

لقد تطلّع الفيزيائي النمساوي لودفيغ بولتزمان L. Boltzmann (1906-1844)، الذي كان حسيراً (قصير البصر)، إلى أعماق طبيعة المادة، بدرجةٍ لم يبلغها أيٌّ من معاصريه، إلى أنْ شنق نفسه بسبب عدم استيعابهم لأفكاره ورفضهم لها. فقد بيّن أن الإنتروبيا مقياسٌ للفوضى: فكلما ازدادت الفوضى، ازدادت الإنتروبيا. فالمادة الصلبة، التي لها صفوفٌ مرصوصةٌ جيّداً من الجزيئات، أكثر ترتيباً من المائع، الذي له جزئياتٌ مرصوصةٌ جيداً لكنها متحركة، ثم إنّ للجسم الصلب إنتروبيا أقل من المائع الذي يتحول إليه الجسم بعد انصهاره. والغاز، الذي له جزيئات متطايرة بحرية، يتسم بفوضى أشد من المائع، لذا للغاز إنتروبيا أعلى من المائع الذي تبخّر منه الغاز.

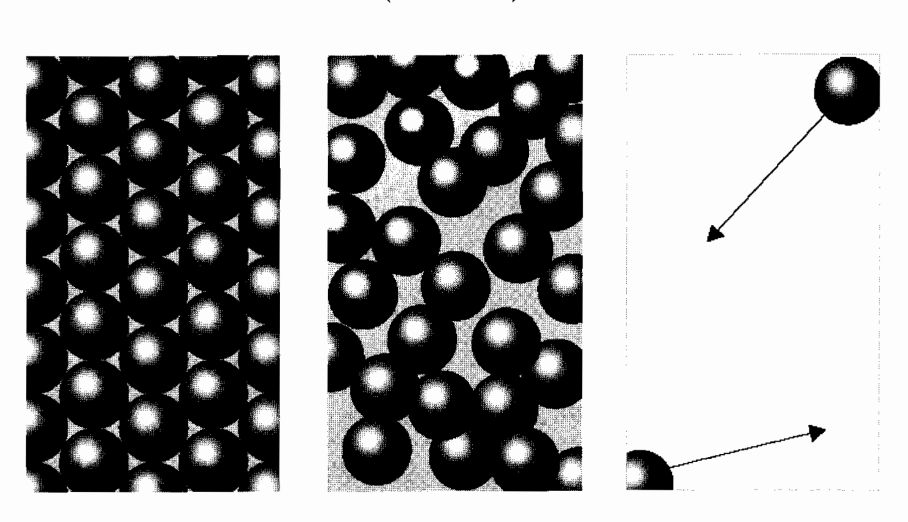
إن التغيرات في الإنتروبيا ترافِقُ التسخينَ، وأيضاً التغيراتِ في الحالة الفيزيائية. وهكذا فعندما نسخّن مادةً صلبةً، فإن جزيئاتها، قبل انصهار المادة، تتحرك بعنف أشد مع ارتفاع درجة الحرارة، ونحن نستخلص أنه لهذا السبب

تزداد الحركة الحرارية الفوضوية. عندئذٍ تفعل الإنتروبيا ذلك أيضاً، ويصحّ الشيءُ نفسُه عندما نسخّن مائعاً، لأنه عندما ترفعُ درجة حرارته، فإن جزيئاته تتحرك بعنف أشد، وعندئذٍ تحلّ بالمجموعة الكليةِ من الجزيئات المتعثّرة والمهاجرة فوضى أشدّ. وعندما نسخّن غازاً، تتحرك الجزيئات في مجالٍ أوسع من السرعات، ومن ثم تحلّ بالجزيئات فوضًى أشد في حركتها الحرارية: ومرة أخرى نقول إن رفع درجة حرارة الغاز تُحْدِثُ زيادةً في الإنتروبيا. وعندما يتمدد الغاز ليملأ حجماً كبيراً، فإن الفوضى التي تدبّ فيه، ومن ثم إنتروبيته، تزداد برغم أننا نُبقي درجةَ حرارتِهِ على حالها دون تغيير، وذلك لأنه على الرغم من أن لجزيئاته السرعةَ نفسها، فإننا نصبح أقل ثقة بأن جزيئاً ما سيُعثر عليه في منطقةٍ صغيرةٍ معطاةٍ من حاوية الغاز. وحين تغادر الطاقةُ جسماً ساخناً على شكل حرارةٍ، فإن الحركة الحرارية للجزيئات المحيطة به تتزايد مع انتشار الطاقة إليها، ومن ثم تتزايد إنتروبيا المحيط. واختصاراً، تتزايد الإنتروبيا مع تحوّل الفوضى الحرارية لمادة إلى مزيد من الشدة، ومع تزايد الحركة الحرارية لذرّات المادة. الإنتروبيا تزداد أيضاً مع تزايد الفوضى المكانية، وهي المدى المتاحُ لمواقع ذراتها.

وحيثما نقابل فوضى متزايدة، نقابلُ إنتروبيا متزايدةً (الشكل 4-7). لهذا فإن الإنتروبيا مفهومٌ بسيط: فكلّ ما يجب تذكّره هو أنها مقياس للفوضى. وفي معظم الحالات البسيطة، يمكننا الحكمُ في لحظةٍ من التفكير ما إذا كانت الإنتروبيا تتزايد أو تتناقص، وذلك حين حدوث تغيّر. النقطة المخادِعةُ الوحيدةُ - في الحقيقة إنها ليست كذلك حقاً، إنما هي بيان للدقة التي يجب التفكير بها في الترموديناميك - هي أنه لتطبيق رأي كلاوزيوس في الإنتروبيا بأنها مَعْلَمٌ للتغيّر، يتعيّن علينا التفكيرُ في التغيّر الكلّيّ للإنتروبيا، الذي يعني التغيّر الكليّ للإنتروبيا في الجسم المعنيّ وفي بقية العالَم. إن إنتروبيا بقية العالَم أسهلُ ممّا نظن، لأنّها تزداد إذا تحوّلت الطاقة إلى بقية العالم على شكل حرارة، وتنقصُ إذا تدفقت الطاقةُ منه على شكل حرارة إلى الجسم المعنيّ. يجب إبقاء كلّ هذا في أذهاننا.

ثمة نقطة تمهيدية هي أنه يجب أن يكونَ واضحاً الآن أنّ الإنتروبيا لا

تزداد بشيءٍ مادي يُضاف إلى العالَم. إن زيادةً في الإنتروبيا تبيّن الفوضى المتزايدةَ للعالَم، والانخفاضَ في جودة الكمية الثابتة من الطاقة التي يحويها. لا وجود لمنبعٍ كونيّ خارجي للإنتروبيا: فالزيادة في الإنتروبيا هي مجرد ارتفاع للفوضى في الطاقة والمادة التي لدينا. ومفهوم الإنتروبيا في حدّ ذاته أسهل كثيراً من مفهوم الطاقة. ومن الصعوبة بمكان تقديم تعريف دقيق للطاقة. وقد نشير إلى أنها القدرة على إنجاز عملٍ، أو (كما سنرى في الفصل 9) أنها سمةٌ للزمكانِ المقوَّسِ (المنحني) curved، أو حتى أنها التقوّس نفسه: لكن الواقع أن كلاًّ من هذه التعريفات لا يبدو معبِّراً بدقة عن الطاقة. وبالمقابل، فالإنتروبيا سهلةٌ، إذ إنّ كلَّ ما علينا عمله هو التفكير في فوضى توزيع الطاقة والمادة، ومن ثَمَّ لدينا سيطرةٌ نوعيةٌ تامّةٌ على مفهومها. لكن، ويا للأسف، فقد دُفِعَ بولتزمان إلى حتفه نتيجة عجز معاصريه من العلماء عن التوصّلِ إلى فهم هذه الرؤية البسيطة، وإن كانت ثاقبةً وعميقةً (الشكل 4-8).



الشكل **4-7**. إن إنتروبيا العيّنات في هذه الأشكال الثلاثة متزايدةٌ باطّرادٍ من اليسار إلى اليمين. ويمثّل الشكل الأيسر صفيفاً منظّماً من الجزيئات في جسمٍ صلبٍ، لذا فلهذه العينة إنتروبيا منخفضة. وتمثل العيّنةُ الوسطى ترتيباً أقلّ انتظاماً لجزيئاتٍ في سائلٍ، لذا فلها إنتروبيا أعلى. وتمثّل العيّنةُ اليُمنى بنيةً غازيةً شواشيةً جدًا [لكلمتي gas (غاز) وَ chaos (شواش) جذرٌ واحد]، حيث تندفع الجزيئات عشوائياً: لذا فلهذه العيّنة أعلى إنتروبيا.

الشكل 4-8. هذه شاهدة قبر بولتزمان التي نُقِشَ عليها إحدى معادلاته المركزية التي تربط مفهوم الترموديناميك بسلوك الذرّات والجزيئات. صيغة المعادلة هي:
الإنتروبيا = عدد ثابت × لوغاريتم عدد الترتيبات الذرية الممكنة
وهكذا، فعندما يزداد عدد الترتيبات الذرية (مثل التحول من الصلابة إلى السيولة ثم إلى الحالة الغازية)، تزداد الإنتروبيا. وتقدّم هذه الصيغة الأفكار النوعيّة التي شرحناها بصيغةٍ كميةٍ عدديةٍ دقيقةٍ.

قد يبدو التفسير الجزيئيّ للإنتروبيا بعيداً عن تعريف كلاوزيوس لتغيّر الإنتروبيا بدلالة الحرارة المزوَّدة ودرجة الحرارة التي يجري بها هذا التزويد. بيد أنه يمكننا التوفيق بينهما، لنرى كيف أن الفوضى هي الأساس الذي يستند إليه تعريف كلاوزيوس. التشبيه الذي أحب استعماله لإظهار الرابطة هو العطاسُ في شارعٍ مزدحمٍ أو في مكتبة هادئة. العطاس يشبه إدخالاً فوضوياً للطاقة، وهذا يشبه كثيراً طاقةً حُوِّلَتْ إلى حرارةٍ. ويجب أن يكون من السهل قبولُ أنه كلّما زادتْ قوةُ العطسةِ، ازدادت الفوضى التي دبّت في الشارع أو المكتبة. هذا هو السبب الأساسي في أن «الطاقةَ المزوَّدة على شكل حرارةٍ» تظهر في صورةٍ (بسط) numenator عبارة كلاوزيوس، لأنه كلما ازدادت الطاقة المزودة على شكل حرارة كَبُرَتْ الزيادة في الفوضى، ومن ثَمَّ كبرت الزيادةُ في الإنتروبيا. إن وجود درجة الحرارة في المخرج (المقام) denuminator ملائم لهذا التشبيه أيضاً، وهو يقتضي أنه، في حال إمدادٍ معطى للحرارة، فإن تزايد الإنتروبيا إذا كانت درجة الحرارة منخفضة يكون أكبر مما لو كانت درجة

الحرارة عالية. الجسم البارد، الذي تجري فيه حركة حرارية طفيفة، يوافقُ مكتبةً هادئةً. فالعطسة المفاجئة تُحدِثُ قدراً كبيراً من الانزعاج، وهذا يوافق ارتفاعاً كبيراً في الإنتروبيا. أمّا الجسم الحارّ، الذي يجري فيه قدر كبير من الحركة الحرارية، فيوافقُ شارعاً مزدحماً بالمارّةِ والسيّاراتِ. وأمّا تأثير عطسةٍ بنفس الشدة التي حدثت في المكتبة الهادئة، فطفيفٌ نسبيًّا، ومن ثَمَّ تكون زيادةُ الإنتروبيا طفيفةً.

يمكننا الآن رؤيةُ ما الذي يسعى القانون الثاني للتعبير عنه. إن العبارة القائلة إن الإنتروبيا لا تتناقص البتة في أي تغيّر طبيعيٍّ، تكافىء قولنا إن الترتيب الجزيئي لا يتزايد طوعاً. إن الجزيئات المرتبة عشوائياً ـ كما في غيمةٍ غباريّةٍ ـ لن تكوِّنَ نفسَها تلقائيًّا في تمثال الحرية. ولن يتجمع غازٌ تلقائيًّا في زاويةٍ من حاوية. الطاقة المنتشرة على نطاقٍ واسعٍ لن تفيض تلقائيًّا في منطقة صغيرةٍ، والبيضة لن تُسْلَقَ تلقائيًّا على طاولةٍ باردة.

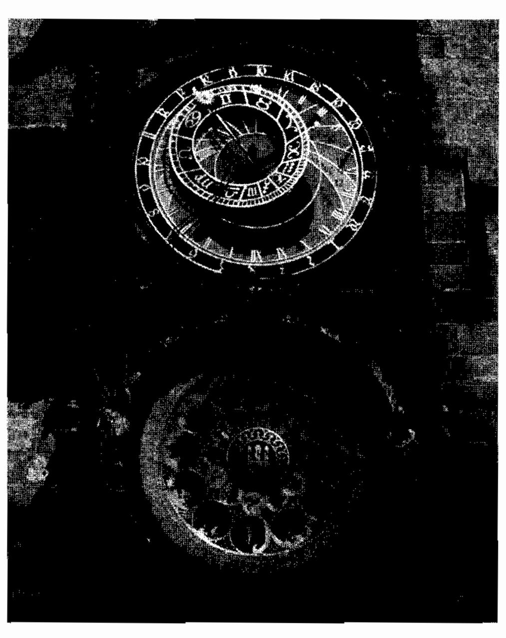
يمكننا الآن رؤية السبب في كون مَعْلَمِ التغيّر التلقائيّ يشير إلى اتجاه الإنتروبيا المتزايدة. الفكرة الأساسية هي أن المادة والطاقة المتوضّعتين والمنظَّمتين تميلان إلى التشتّت. فالذرّات في تقلقلاتها العشوائية تجنح إلى الهجرة إلى بيئاتٍ جديدةٍ؛ فطاقة التقلقلات العشوائية تنتقل بين الذرات المتجاورة التي يصطدم بعضها ببعض. الاتجاه الطبيعيّ للتغيّر هو نحو فوضًى أشد، سواءً أكانت فوضى في تموضع المادة، أو فوضى في تموضع الطاقة، أو فوضى حرارية. وفي الحالة الطبيعيّة يتحول النظام إلى فوضى، وتنحطّ الطاقة وتتشتت. وسواءً أأعجبك أم لا، فإن العالَمَ يتجه إلى الأسوأ.

إن اتجاه العالَم إلى الأسوأ، وَغَرَقَهُ بلا هدف في الفسادِ، فسادِ جودة الطاقة، هما الفكرةُ الوحيدةُ العظيمةُ المجسَّدةُ في القانون الثاني من الترموديناميك. إنها رؤيةٌ استثنائية لمعرفة أنّ جميع التغيرات التي تجري حولنا هي مظاهر لهذا

الانحطاط. إن سمةَ العالَمِ التي أبرزها القانونُ الثاني تتجلى في انحطاط العالَمِ الذي لا يمكن إيقافه، وذلك نتيجة الانتشار الفوضوي للطاقة والمادة.

يمكنك الآن أن تنظر إلى العالَمِ نظرةً كئيبةً بسبب الصعوبات التي يجابهها. فإذا كان اتجاه العالَمِ يسير نحو الانحطاط، فما هي الأماكن فيه الملائمة لبروز بُنًى وأناسٍ رائعينَ، وأفكارٍ وأعمالٍ نبيلةٍ؟ وقد أحدثتْ هذه الرؤيةُ بعضَ الفزعِ لدى الناسِ في العصر الفكتوري، الذين رأوْا التحسّن المتواصلَ الذي لا يتوقف لدى البشر، وبخاصةٍ في النصف الشمالي من الكرة الأرضية التي اعتبروها مصدراً للكبرياء والإبداع. لكنْ كيف يمكن للامبراطوريات التي تحكمها المبادئ الأخلاقيّةُ فرض الحضارة التي تعتبرها عاليةً إذا كان الحاكمون والمحكومون يسيرون رغماً عنهم إلى انحطاطٍ لا مفرّ منه؟ كيف يمكن للسيطرة المتزايدة المتعاظمة للمادة أن تنسجم مع مستقبلٍ للعالم ينجرّ رغماً عنه نحو درك أسفل برغم كل شيء؟ وبالطبع، فمع أن القانون الثاني قد يلخص المحرّك البخاريّ بطريقة جميلة إلى حدٍّ ما، فإنه لم يلخّص أفعال الإنسان ـ بل حتى أفعال صرصور.

لحلّ هذا التناقض، علينا ملاحظة أن النقطة الحاسمة التي يجب فهمها هي أن التغير لا يمكن أن يكون جزيرة منعزلة من النشاط: فالتغير هو شبكة من الأحداث المرتبط بعضها ببعض. ومع أن الاندفاع نحو الانحطاط قد يحدث في موقع واحد، فقد تكون تداعيات هذا الاندفاع الإنشاء التدريجي لبنيةٍ في مكان آخر. ويذكّرني هذا بميقاتيةٍ في القرون الوسطى، هي ميقاتية براغ Prague الفلكية (الشكل 4-9) التي يَدْفَعُ فيها وزنٌ ساقطٌ مجموعةً من النشاطات. وعموماً، ثمة تشتّت في الطاقة، وزيادة في الإنتروبيا، وذلك عندما يسقط الوزن ويبدّدُ الاحتكاكُ طاقتَه على شكل حرارة في محيط الميقاتية. بيد أنه لما كانت الحركةُ المتجهةُ نحو الأسفل للثقل مرتبطةً بسلسلةٍ دقيقةٍ من التروس المسنّنة، وذلك لنمذجة الأقمار والشموس والنجوم، فإن سقوط الثقل يولّد إحساساً بسلوكٍ منظّمٍ وعرْضٍ معقّدٍ. وإذا تجاهلنا إراديًّا عملَ الميقاتيّةِ، فقد نستخلص أنّ الأحداث المنظّمة كانت تجري بطريقة طبيعية. لكنْ نحن، الذين نملك معرفة داخلية، نعرف أن ثمة ميقاتية مدفوعة بوزنٍ ساقطٍ.



الشكل 4-9. تفصيلات الميقاتية الميكانيكية في براغ. هذه الميقاتية هي مجاز للقانون الثاني، إذْ على الرغم من أنه يبدو أن ثمة أحداثاً تجري بطريقة منهجية، فإنها مدفوعة بتوليد فوضى أشد في مكان آخر خلال سقوط الأثقال الدافعة للحركة. الغذاء كالثقل، والخمائر (الإنزيمات) هي مثل دواليبَ مسنَّنةٍ، وأفعالُنا الحقيقيّةُ هي مثلُ حركاتِ الأشكالِ. لا يعني هذا عدمَ وجود إرادةٍ حرّة، لكنّ الحجج التي تسمحُ بالإرادة الحرة أطول مما يسمح به هذا الهامش.

الميقاتية الموجودة في براغ هي مجاز للقانون الثاني. ومع أنه قد تجري أحداثٌ متقنَةٌ في العالم المحيط بنا، مثل تفتُّحِ ورقةِ شجرةٍ، أو نموِّ شجرةٍ، أو تكوينِ رأيٍ، فإن الفوضى آنذاك تتراجع ظاهريًّا، لأن مثل هذه الأحداث لا تجري البتة دون أن تُدفَعَ. ويولِّدُ من هذا الدفعُ إنتاجاً أكبرَ من الفوضى في مكان آخر. والنتيجة الصافية، وهي حصيلة تغيّر الإنتروبيا الناشىء عن تخفيض الفوضى في الحدث البنّاء، وتغير الإنتروبيا الناشىء من زيادة فوضى الدّفع، وهو حدث تبديدي، هي زيادة صافيةٌ في الإنتروبيا، وهي إنتاجٌ إجماليٌّ لفوضًى صافيةٍ. لذا فحيثما رأينا ترتيباً ونظاماً آخذاً في البروز، يتعيَّن علينا رفعُ الستارةِ لرؤيةِ فوضى أشدّ تحدُث في مكانٍ آخر. وهكذا فنحن، بل والبنى كلّها، مخفِّفاتٌ موضعيةٌ للشّواش chaos.

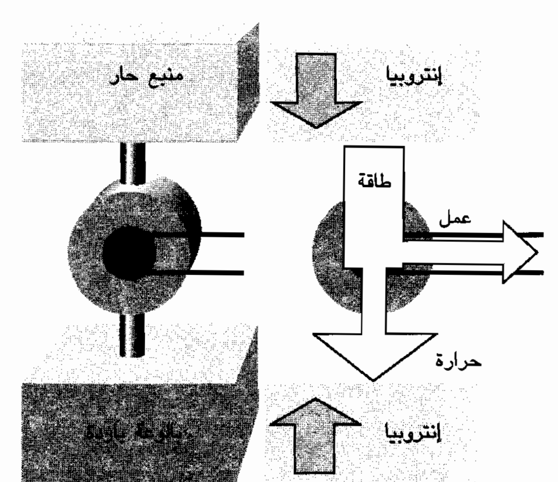
ويمكننا هنا إقامة رابطة أخرى بتطور الحياة الذي استكشفناه في الفصل 1، إذ إن حقيقة وجود حَلَمَاتٍ لدى الرجال، مثلاً، هي نتيجةٌ مباشرةٌ للقانون الثاني في الترموديناميك. إن الانحدار الذي لا يتوقف في جودة الطاقة، الذي يعبَّر

عنه بالقانون الثاني، هو الذي أدّى إلى بروز جميع مكوِّنات الغلاف الحيويّ الحاليّ للأرض. وبمعنًى مباشرٍ جدًّا، فإن كلَّ ممالك المخلوقات نشأت من مادة غير عضوية وذلك خلال غرق الكون بقدر أكبر من الشواش. إن حيوية التغير فساد لا هدف له، بيد أن تداعيات التغيرات المترابط بعضها ببعض هي النشوء الجميل على وجه مذهلٍ للمادة التي نسميها عشباً وبشراً. إن وجود حَلَمَاتٍ لدى الرجال هو نتيجة للأصل المشترك للحيوانات، ولحقيقة أن القانون الثاني يدفع بالطبيعة إلى الأمام دون نظر في العواقب، ودوماً بطريقة عمياء، وأحياناً بحدوث آثار غير ملائمة على المدى الطويل.

●

وفي مكان آخر، فإن موقع النشوء الكبير للفوضى الذي يُحْدِثُ زيادةً في النظام، قد يكون محلِّيًّا جدًّا، أو بعيداً جدًّا. بل ربما يكون هذا الموقع داخلنا. إن آليةَ السّاعةِ الموجودةِ داخلنا كيميائيَّةٌ حيويَّةٌ، حيث أسنان دواليب الساعة مصنوعةٌ من البروتين، لا من الحديد؛ لكنها، مع ذلك، تعمل بنفس الطريقة. إنها تُنَمْذِجُ أيضاً عملَ محرّكٍ بخاريٍّ. لذا لنعد ثانيةً إلى المحرّك البخاريّ وأعيننا مفتوحة على الإنتروبيا. سنرى ما هو هذا المحرّك في الواقع، وتركيبه الداخليّ المجرد، وسنرى، بوجه خاص، سبب كون البالوعة الباردة أساسيةً في عمله.

يمكننا تصور محرّك بخاريٍّ، أو أيِّ محركٍ حراريٍّ، بأنّه يتضمّن خطوتين (الشكل 4-10). الخطوة الأولى في عمل المحرك هي تحويل الطاقة إلى هيئة حرارة مصدرها المستودع الحراريّ. إنّ ضياع الطاقةِ من المستودع يخفّض الإنتروبيا، إذ إن ذرّاته الآن تمتلك حركةً حراريةً أقلّ مما سبق. والطاقة، التي استخرجناها، تتدفق عبر الآليّة لتحويل الحرارة إلى عمل (المكبس والأسطوانة في المحرك البخاريّ الحقيقي)، وتَدْخُلُ إلى البالوعة الباردة. فإذا دخلت كلُّ الطاقة التي استخرجناها من المنبع الحارّ إلى المستودع البارد، فإن إنتروبيا ذلك المستودع تزداد. لكنْ لما كانت درجةُ حرارةِ البالوعةِ أخفضَ من درجة حرارة المنبع، فإن الزيادة في الإنتروبيا أعلى من النقصان الأصليّ (تذكّر الحكاية



الشكل 4-10. التحليلُ الترموديناميُّ لعملِ محرّكٍ بخاريٍّ (أو أيِّ محركٍ حراريٍّ). تترك الطاقةُ المنبَع الحارَّ على شكل حرارة، وبذا تنخفض إنتروبيته. ويتبدد بعض هذه الطاقة لتتحول إلى عملٍ ليس له تأثير في الإنتروبيا. أما بقية الطاقة فتذهب إلى البالوعة الباردة، وهذا يولّد قدراً كبيراً من الإنتروبيا. وإذا كانت درجةُ حرارةِ البالوعةِ الباردةِ أخفضَ من درجة حرارة المنبع الحارّ، فإن الإنتروبيا الإجماليةَ تزداد، حتى لو كانت الطاقةُ التي تبدّدت متحولةً إلى حرارة أقلَّ من تلك التي استُخرِجتْ من المنبع الحارّ. إن الفرق بين الطاقة المستخرجَةِ والمتبددةِ يمكن أن يتحول إلى عملٍ.

الرمزية للمكتبة الهادئة). وإجمالاً، ستزداد إنتروبيا الجهاز، لأنه يجري التغلّب على النقصان في إنتروبيا الجهاز بواسطة الزيادة الكبيرة في إنتروبيا البالوعة. لذا فإن تدفق الحرارة من المنبع إلى البالوعة تلقائيٌّ.

والآن، سنتطرق إلى النقطة الحاسمة. حتى الآن، لم يُنْتِجِ المحرّكُ أيَّ عملٍ، وكان بإمكاننا الحصولُ على نفس النتيجة إذا جعلنا المنبعَ الحارّ على اتصالٍ مباشرٍ بالبالوعة الباردة. بيد أن انتقالَ طاقةِ المنبعِ الحارّ يظلّ تلقائيًّا حتى لو حوّلنا قسماً منها ـ لا كلّها ـ إلى عملٍ، وخزنّا البقيةَ في البالوعة الباردة. وبالطبع، إذا سحبنا طاقةً على شكل حرارةٍ من المنبع الحارّ، فإننا نحصل على انخفاضٍ في الإنتروبيا، كما في السابق. بيْد أن بوسعنا الحصولَ على زيادةٍ تعويضيّةٍ في الإنتروبيا بإطلاق قدْرٍ أقلّ من الحرارة إلى المستودع البارد. وعلى سبيل المثال، إذا كانت درجةُ حرارة البالوعة الباردة نصفَ درجة حرارة المنبع الحار (باستعمال درجات الحرارة المطلقة)، أمكننا الحصولُ على زيادةٍ تعويضيّةٍ

في الإنتروبيا بالسماح لنصف الطاقة المستخرَجَةِ فقط بالدخول إلى البالوعة الباردة، تاركين النصفَ الآخرَ لنا لاستعماله في عملٍ مفيدٍ. المحرّكُ يعمل تلقائيًّا - أي أنه جهازٌ مفيدٌ وقابل للتطبيق viable - لأن ثمة زيادةً إجماليةً في الإنتروبيا مع أننا نستخرج بعضَ الطاقة على شكل عملٍ.

سنرى الآن أن البالوعةَ الباردةَ أساسيّةٌ. وفي تلك الحالة فقط، التي تكون فيها البالوعةُ الباردةُ موجودةً، ويُطلَق فيها بعضُ الطاقة إلى البالوعة، عند ذلك فقط، يوجد بعض الأمل في الزيادة الإجمالية للإنتروبيا. إن استخراج الطاقة، من أي منبع ساخن يقابله نقص في الإنتروبيا. ونقل الطاقة إلى المحيط على شكل عملٍ يتركُ الإنتروبيا على حالها دون تغيير، لذا ففي هذه المرحلة يوجَد نقصٌ إجمالي في الإنتروبيا. فكي يعمل المحركُ تلقائيًّا (والمحركاتُ التي لا تعمل تلقائيًّا، بمعنى أنه لا بدّ من تسييرها، أسوأ من كونها عديمة الفائدة)، من الضروريّ إنتاج بعض الإنتروبيا في مكانٍ ما للتثبّت من أنه يوجد إجمالاً زيادة في الإنتروبيا. هذا هو دور البالوعة الباردة: إنها تتصرف كالمكتبة الهادئة، وهي المكان الذي يوجَدُ فيه زيادةٌ كبيرةٌ في الإنتروبيا، مع أنه لا يُطرَحُ فيها إلاّ قدرٌ طفيفٌ من الطاقة. ومع ذلك، لاحظْ أهميتَها: لا بد من وجود «نفايةٍ» ووعاء لتلك النفاية، إذا كان للمحركِ أن يكونَ قابلاً للتطبيق. المنبع البارد هو في الحقيقة منبعُ قابليّةِ تطبيقِ المحرّكِ، إذ بدونه لا يمكن وجودُ زيادةٍ في الإنتروبيا[8].

يُمثل المحركُ البخاريُّ حقيقةً تتجلى في أنه للحصول على عملٍ - وهذا جُهْدٌ بنّاءٌ - من أيّ عملية، من الضروري وجودُ تبديدٍ للطاقة. إن مجرّدَ سَحْبِ طاقةٍ من المنبع لا يعملُ شيئاً: إذْ يجب أن تبدِّدَ بعضَ الحرارةِ لتحرّضَ البالوعةَ الباردةَ (التي قد تكون، ببساطةٍ، المحيطَ، دون أن تكون بالضرورة جزءاً من المحرّكِ) بغية جعل المحرّكِ يعملُ. وحيثما نجدُ بِناءً، نجد تدميراً يرتبط به، له نفس الشدة على الأقل.

(8) أَتْرُكُ تحديًّا لكَ لتبيِّنَ أنّ الطاقةَ التي لا بدّ من توجيهها لتجعلَ المحرّكَ قابلاً للتطبيق تعتمد على نسبةِ درجتي حرارةِ المستودعيْن الحارِّ والباردِ، وأنّه بهذه الطريقة، من المعقول اشتقاق عبارة كارنو للفعاليّة المقتبَسة في الحاشية رقم 2.

لننظرْ إلى بعض التغيرات التي تجري في العالم، ونرى كيف أنها مع كونها بنّاءة، فإن بقاءها منوطٌ بالهدم في مكان آخر. لنأخذ أولاً العالَمَ الخارجيّ. إن أيَّ نشاط إنشائي، كبناءِ جدارٍ، يحتاج إلى عملٍ يجب إنجازه، وذلك لوضع مركِّبات المبنى في مواضعها. ولتنفيذ هذا العمل، لا بدّ من استعمال محركات (من ضمنها المحركات العضلية للأجسام التي تزوّد بالغذاء)، وكي يكون المحركُ قابلاً للتطبيق، يجب توليدُ إنتروبيا عن طريق تبديد الطاقة في البيئة. وهكذا فإن محرِّكَ رافعةٍ، ومحركاً حراريًّا من أي نوع، يعملان بتبديد طاقةٍ في محيطيهما. هذا صحيح حتى إذا كانت الرافعةُ كهربائيةً، حيث تبدَّد الطاقةُ في محطّةٍ للطاقةِ تقع على مسافةٍ معينة من الرافعة. إن جميع البُنى الصّنعيّة في العالَمِ، بدءاً من الأهرام الضخمة، وصولاً إلى مجرد خيمةٍ، لم يكن لها أن تُنْجَزَ بدون تبديدِ طاقةٍ.

يمكن النظر من مسافةٍ أقصرَ إلى الطريقة التي يجري بها تبديدُ الطاقة، وذلك بدراسة التفاعلات الكيميائية التي تُستعمَلُ لرفع درجة حرارةِ المنبعِ الساخنِ. سأركّز على محرّكٍ بخاريٍّ تقليديٍّ في هذه المناقشة، إذْ برغم أنّ مبدأ محرّكِ احتراقٍ داخليٍّ هو نفس مبدأ المحرك البخاريّ عندما نتحدث عن العمليات، فهو مصنوع بطريقة تقانية جدّ دقيقة، ولا أريد أن أشتّتَ انتباهكم بالتفصيلات. المحرّكُ البخاريُّ هو محرُّكُ احتراقٍ خارجي، يجري فيه تسخينُ الماء بالنار خارج المكبس، لذا يكون من الأسهل هنا متابعة تسلسل الأحداث.

لنفترضْ أنّ الوقود هو البترول، وهو مزيجٌ من الهيدروكربونات (مركَّباتٍ من الكربون والهيدروجين فقط) يماثل سلسلةَ ذراتِ الكربونِ الستّ عشرة المبيّنةِ في الشكل 4-11. هذا هو الجزيء النموذجيّ لزيت الوقود (الفيول) ووقود الديزل؛ إنه مرتبطٌ ارتباطاً وثيقاً أيضاً بجزيئات الشحوم الموجودة في اللحوم، التي تساعد على تزليق الألياف العضلية، وتقوم، أيضاً، مقامَ طبقةٍ عازِلةٍ واحتياطيّ للوقود. إنّ أَكْلَنَا للموادّ الغذائيةِ مرتبطٌ ارتباطاً وثيقاً بوقود الديزل. وأن يحدث هذا لدى البعض أكثر من البعض الآخر ليس مصادفةً، لكن الفكرة واقعية إلى حد ما.

عندما يحترق البترول، تُهاجَمُ الجزيئات، كتلك الموجودة في الشكل من قِبَلِ

جزيئات أكسجين الهواء. وفي خضمّ هذا الهجوم، تتفكّك سلسلة الكربون وتُنْزَعُ ذرّات الأكسجين عنها. ويجري إبعادُ جزيئات ثنائيّ أكسيد الكربون، وتُحْمَلُ ذراتُ الهيدروجين بعيداً عن جزيئات الماء. وينتجُ قدرٌ كبيرٌ من الحرارة لأنّ الروابط المشكَّلة حديثاً بين الذرّاتِ أقوى من الروابط الأصلية في الفيول وفي الأكسجين، لذا فإن الطاقة تُحَرَّرُ عندما يُستعاضُ عن الروابط القديمة الضعيفةِ بروابطَ جديدةٍ قويةٍ، وتستقرّ الذراتُ في ترتيباتٍ أكثرَ ملاءمةً طَاقِيًّا. لكن لماذا يحترق الهيدروكربون؟ السبب هو أن ذلك يولّد زيادةً ضخمة في الفوضى، ومن ثم في الإنتروبيا. ثمة إسهامان رئيسيان لهذه الزيادة في الإنتروبيا. أحدها تحرير طاقةٍ تتبدَّد في المحيط وترفعُ إنتروبيتَهُ. والآخرُ هو تشتّتُ المادّة مادامت سلاسلُ الذرّاتِ تفكَّكُ، والذرّاتُ المنفردةُ تنتشرُ من موقعِ الاحتراقِ على شكل جزيئاتٍ غازيّةٍ صغيرةٍ. إن الاحتراق يرسم صورةً لمحتوى القانون الثاني.

لنفترض مؤقّتاً أنّ الطاقةَ المحرّرة في الاحتراق محصورةٌ باللهب. إن هذه المنطقة الساخنة التي يجري فيها حرق الوقود، متّصلةٌ عبر جدرانٍ معدنيّةٍ بالماء الذي نَوَدُّ تسخينَهُ. إن التّصادمات العنيفةَ للذراتِ في اللّهب تواكَبُ بحرارةٍ عاليةٍ، في حين ترافَقُ التصادماتُ الضعيفةُ للماء بحرارةٍ منخفضةٍ. لقد سبق ورأينا أن إنتروبيا العالم تتزايد مع تدفق الحرارة إلى جسم بارد، ومن ثَمَّ فإن جريان الطاقة من محرّكِ احتراقِنَا إلى الماء هو عمليةٌ تلقائيّةٌ تزيد الإنتروبيا.

الماء حارٌّ الآن، ودرجةُ حرارته، من وجهة المبدأ، قد ترتفع لتصبحَ بدرجةِ حرارةِ اللهب نفسِهِ. لكنْ مع ارتفاع درجة حرارة الماء، نصل إلى نقطة يغلي فيها الماءُ. تُرَى، لماذا يفعل ذلك؟ الجواب طبعاً هو أنَّ تكوُّنَ البخار يُصبحُ عمليةً تلقائيةً حال بلوغِ درجةِ الحرارةِ قيمةً معينةً، وهي «نقطةُ غليانٍ» الماء.

لفهم سبب غليان الماء، علينا فحص التغيّرات التي تحدث في الإنتروبيا. وهنا سنكتشف سمةً طريفةً للغليان، وهي وجهةُ نظرٍ ترموديناميّةٍ مختلفةٍ. أولاً، نلاحظ أنّ ثمة إسهامَيْن متعارضَيْن في تغيّر الإنتروبيا حين يتحول الماء إلى بخار. فيوجد زيادةٌ كبيرةٌ في الإنتروبيا حين يصبح السائلُ غازاً. وتوحي هذه

الشكل 4-11. جزيءٌ ستة عشري (في مركز حشد الجزيئات المبيّنة في اليسار) ممثّلٌ لجزيئات الهيدروكربون الموجودة في الوقود والمواد الدسمة الموجودة في الأغذية. إنه مؤلّف من سلسلةٍ من ستَّ عشرَة ذرّةَ كربونٍ (الكرات الغامقة اللون) التي يتّصل بها 34 ذرة هيدروجين (الكرات الصغيرة الشاحبة اللون). فكّر في الجزيء بأنه يلتوي ويلتفّ خلال حركته عبر جيرانه الذين يلتوون ويلتفون. وحين يحترق هذا الجزيء، تهاجمه جزيئات الأكسجين، وتُبعَدُ ذرات الكربون، وذلك حين يُبْعَدُ على شكل 16 جزيئاً منفرداً من ثنائيّ أكسيد الكربون، كما أنّ ذرات الهيدروجين تُبْعَدُ على شكل 71 جزيئاً منفصلاً من الماء (في اليمين). يوجد زيادة كبيرة في الفوضى الموضعية. أضف إلى ذلك أنّ الحرارةَ تُطْلَقُ إلى المناطق المحيطةِ خلال تكوُّنِ روابطَ بين الذرّات، أقوى من الروابط بين المواد الأصلية. وتكون النتيجة أن يرافقَ الاحتراقُ بزيادةٍ كبيرةٍ في الإنتروبيا.

الزيادة بأنه يوجد دوماً ميل للماء إلى التبخر. لكن تبخر الماء يتطلب طاقةً، لأن التجاذبات بين جزيئات الماء، التي تجعل الماءَ متماسكاً معاً، يجب التغلب عليها لتعطيَ غازاً ذا جزيئاتٍ مستقلةٍ. لذا فعندما يتبخر الماء، يجب أن تتدفق الطاقةُ إلى السائل. إن هذا التدفق نحو الداخل للطاقة يخفض إنتروبيا المحيطِ، لأنه يقابل دفقاً للطاقة منه. وفي درجات حرارةٍ منخفضةٍ، فإن الانخفاضَ في إنتروبيا المحيط، نتيجةَ هذا الدفقِ للطاقة، كبيرٌ (المكتبة الهادئة ثانيةً)، ومع ذلك، فثمة زيادةٌ في إنتروبيا الماء لدى تبخّره، والنتيجة الإجمالية هي انخفاضٌ في الإنتروبيا. لذا، ففي درجات الحرارة المنخفضة، لا يكون التبخر تلقائياً. بيدْ أنه عندما نرفع درجة حرارة المحيط، فإن الانحدار في إنتروبيته يصبح طفيفاً (الشارع المزدحم)، وفي درجة حرارةٍ عاليةٍ بقدرٍ كافٍ، يُصبح التغيّر الإجماليُّ، إنتروبيا الماء والمنطقة المحيطة، إيجابيًّا. ولما كان للماء نزعةٌ تلقائيّةٌ إلى التبخّر، فإنه يغلي. وهنا تبرز السّمة الطريفة التي ذكرناها آنفاً. نحن نرى أن نتيجة زيادة درجة الحرارة هي تخفيض تغيّر إنتروبيا المحيط إلى النقطة التي يكون

فيها التغير الإجمالي في الإنتروبيا إيجابيًّا. وكأنّ هذا يعني أنه لتحقيق التبخر، يجب علينا تلطيفُ الأثر الكابح للمحيط بواسطة رفع درجة حرارته.

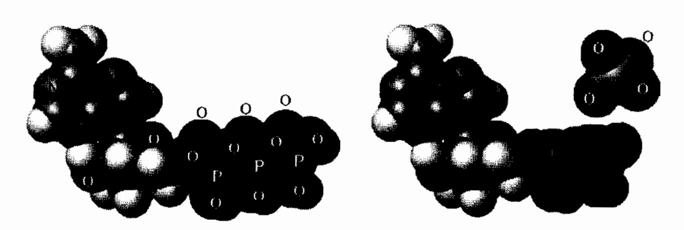
حتى الآن، يكون القانون الثاني قد ظهر ثلاث مرات: في السيطرة على الاحتراق، وفي توجيه التدفق من اللهب إلى الماء، وفي تبخر الماء. لكن هذا القانون يتدخل الآن مرةً رابعةً: في تدفق الطاقة عن طريق المحرك، وتحويل بعضها إلى عملٍ. وقد تطرقنا إلى هذه المرحلة في وقت سابق، ولا توجد ضرورةٌ لإعادتها. ومع ذلك، فإن النقطة التي حاولَتْ هذه المناقشةُ إبرازَهَا، هي أنّ كلَّ مرحلةٍ لعمليةِ المحرّكِ، من حرق الوقودِ إلى إنجازِ التغيّر الخارجيّ، تُنَفَّذُ بالميل الطبيعيّ للمادة والطاقة إلى التبدّد. العالَمُ يُدفَع إلى الأمام بهذا الميل الشامل إلى الانحدار نحو الفوضى. نحن، وكلّ الأشياء التي نصنعها، وكل إنجازاتنا، هي في النهاية حصيلةُ هذا الانتشار الطبيعيّ، الذي لا هدف له، للفوضى المتزايدة أبداً.

●

إن أكبر الإنجازات هو، بالطبع، الجواب عن السؤال: لماذا يجب علينا أن نأكل؟ يتعين علينا تناول مَدَدٍ من الطاقة نسمح لها، بواسطة عملياتٍ استقلابيّةٍ معقّدةٍ تتخلّل أجسامَنَا، بالانتشار في بيئتنا. وعندما تفعلُ ذلك، تولّدُ قدراً كافياً من الفوضى ليصبح العالَمُ أكثر فوضويّةً إلى حد ما. الأكل عملية أعقد من إعادة الإمداد بالوقود، لأنه، خلافاً للوقود الذي يزود مركباتنا بالطاقة، فنحن نستعمل كثيراً من المادة التي نُدخلُها إلى جوفنا للترميم والنمو. بيد أنه لما كان الطعام مصدراً للطاقة، فهو وقودٌ لتسخين المستودع الحارّ للمحرّك البخاريّ داخلنا، وهو يدفعنا ويدفع أفعالنا نحو الأمام بفضل تبديد بعض الطاقة الداخلة وتحويلها إلى فضلات.

إن المحرّكَ البخاريَّ الموجودَ داخلنا ـ أو، على الأقل، جوهره التجريديّ ـ موزَّعٌ على كلِّ خلايانا، ويتخذ آلافاً من الأشكال المتباينة. وسنكتفي بالنظر إلى

أحد إنجازات المحرّك البخاريّ البيولوجيّ. إحدى الجزيئات التي تظهر بكثرة في كلّ خلية هي الأدينوزين ثلاثي الفسفات adenosine triphosphate (ATP، الشكل 4-12). وكما نرى في هذا الشكل، تتكوّن هذه الخلية من جزء عضويّ ثقيل جدًّا، ومن رتلٍ قصير من الزمر الفسفاتية (ذرات فسفورية محاطة بذرات أكسجين). وما يهمّنا هو الرتل القصير من الفسفات. يُشبه هذا الجزيء المستودع الحار لمحرك بخاري. فعندما ينطلق إلى العمل بناءً على طلب الإنزيمات (الخمائر) الموجودة في الخلية، فهي تنبذ الزمرة الفسفورية الأخيرة، لتصبح في النتيجة أدينوزين ثنائي الفسفات adenosine diphosphorate (ADP). وتُستعمَلُ الطاقةُ المحرّرةُ في إمداد الأحداث البناءة بالطاقة ضمن الخلية، مثل تكوين البروتين، أو إعداد خلية عصبيّةٍ لنقل إشارةٍ. إن اندفاع التفاعل نحو الأمام ينتج من تبدّد المادة (إطلاق زمرة الفسفات) والطاقة، وهذا قد يقوم بإثارة فوضى حرارية. وهكذا فإن تكوين بروتين، أو حتى تكوين رأيٍ، يمكن تعقّبه للوصول إلى هذا الشبه الدقيق بالمحرك البخاريّ.



الشكل 4-12. إن الجزيئات المسماة أدينوزين ثلاثي الفسفات (ATP، في اليسار)، وتلك المسماة أدينوزين ثنائي الفسفات (ADP، في اليمين) تقوم مقام المستودعاتِ الحارّة والباردة للمحرّك البخاريّ النظريّ الموجود في داخلنا. ولإعادة بناء ATP من ADP، عن طريق إعادة ربط زمرة الفسفات، علينا مزاوجة المحرّك بمحركٍ أقوى (بمعنى أنه يولّد قدراً أكبر من الإنتروبيا). اي أنّه يجب علينا تناول الطعام. ولإنتاج الطّعام الذي نتناوله، يجب أن تتّقد الشمس (بطريقتها النووية).

وكي تواصل الخليةُ، ونحنُ، الحياةَ، يجب أن يُعاد ربط زمرة فسفاتية ـ ليس من الضروري أن تكون نفس الزمرة ـ بـ ADP لإنتاج ATP. ويمكن إنجاز إعادة البناء بواسطة مزاوجة التفاعل الذي يؤثر في إعادة الربط، بمحرّكٍ بخاريٍّ أقوى، هو تفاعل استقلابي آخر يبدّد المادّة والطاقة بطريقة أكثر فعالية. نحن

ندخل في أجسامنا مادة تقوم مقام وقود للمحرك البخاري الذي يُحْدِثُ تكوّنَ ATP من ADP الذي يقوم بدوره بدفع نمونا ونشاطاتنا.

أمّا الطّعام نفسه فيجب أن يشكِّل بمزاوجة التفاعلات التي تكوّنه ليصبح محركاتٍ بخاريةً نظريةً أكثرَ فعاليةً، محركاتٍ تبدِّدُ بفعاليةٍ أعلى، إن أقوى محرك بخاري هو الشمس، لأن الطاقة التي تبدّدها وتنشرها في محيطها تدفع التفاعلاتِ التي تولّد التفاعل (الاصطناع) الضوئي photosynthesis، وهو تكوينِ الكربوهيدرات من ثنائي أكسيد الكربون والماء. لذا، فإن نشاطاتِنَا وطموحاتِنَا مدفوعةٌ، في النهايةِ، بالطاقة المحرّرة عند التحام النوى معاً في الشمس. وربما كان القدماء على حقٍّ في تقديسهم للشمس بوصفها مانحةً للحياة؛ لكنهم لم يكونوا يدركون أنها القوة المحرّكة للفساد الكونيّ.

إن النمط الذي سلكناه في تسليط الضوء على الأساس الجزيئي للحياة، وذلك في الفصل 2، ينطلق أيضاً من القانون الثاني. الحياة عمليّةٌ تجول فيها الجزيئاتُ، وذلك لتتخّذ الشكل الصحيح للتلاؤم مع محيطها. ويوضحُ الأساسُ الجزيئيُّ لإعادةِ الإنتاجِ النشاطاتِ غيرَ الواعيةِ للجزيئاتِ والطاقة. وتستمر الحياة لأن التجوال المضطرب للجزيئات أتاح فُرَصاً للانتقاء الطبيعيّ، وهي فرصٌ للجزيئات تسمح لها بالتجوال بطريقةٍ عمياء لاواعيةٍ دون اعتماد اتجاه معين، وذلك لبناء هذا النسيج العظيم من النشاطات التي تتضمنها الحياة. الحياةُ، في الأصل، هي تجوّل جزيئي متعثر.

●

ربما كان السؤال الذي يقفز إلى أذهاننا عند هذه النقطة هو: هل سيستمر هذا التبديد للمادة والطاقة إلى الأبد؟ أو هل سيصبح الكونُ فوضويًّا دون حدود إلى درجة لا تتمكن فيها الإنتروبيا من التزايد، ومن ثَمّ تصلُ الأحداثُ إلى نهايتها؟

إن الانتهاء التخميني للمدّ الطبيعي للأحداث، وذلك بتوقّفِ الإنتروبيا عن التزايد، يسمّى الموت الحراري heat death للكون. عندئذٍ، لمّا كانت الأمور

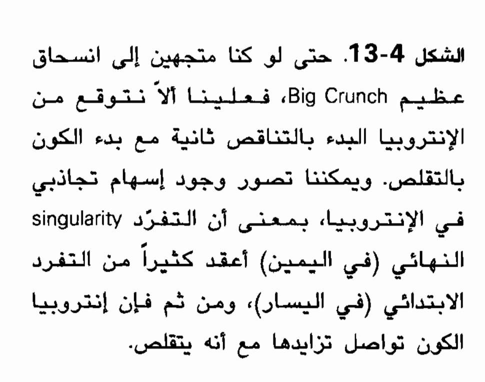
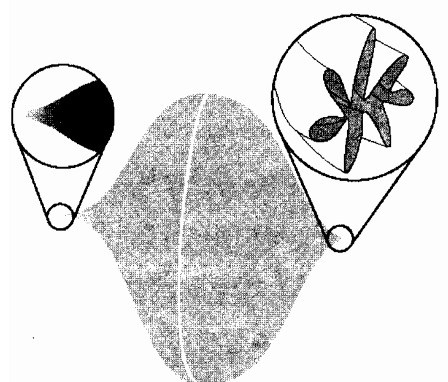
ستصل إلى ذروةِ السوءِ، فلن يحدث شيءٌ البتّة. ثمة نقطةٌ يجب إيضاحها: فإذا كان كُتِبَ على العالم الموتُ حراريًّا، فلن يعني هذا أن الزمنَ سيبلغ نهايتَهُ. ستستمر الأحداثُ ـ ستواصل الذرّات التصادمَ بعضها ببعض ـ لكنْ لن يكون ثمة تغيّر صرفٌ. إن جميع المحركات البخارية، سواءً أكانت نظريةً أم حقيقيةً، ستتوقف عن العمل، بسبب عدم إمكان توليد الطاقة. ولدى آخرين وجهة نظر أكثر تفاؤلاً، وهم يحاجّون في أنه إذا كُتِبَ على العالَمِ البدءُ بالتقلّص، فإن الإنتروبيا ستتناقص، لأن فضاء الطاقة والمادة سيصبحُ أصغر. لذا فهم يعتقدون بأن الأحداث ستنعكس، وستسود تلك الأيامَ قواعدُ معاكسةٌ لتلك التي تُنْسَبُ إلى كلفْن وكلاوزيوس، وربّما تصبح إنتروبيته متزايدةً مرةً أخرى في عالَمٍ أعيد إحياؤه من جديد.

لنحاول الآن فرز المواضيع المطروحة. أولاً، دعُونا نقبل الفكرة السائدة التي سنستكشفها بتفصيلٍ أكبر في الفصل 8، والتي فحواها أنّ العالَمَ لن يتحوّل من تلقاء نفسه ويتقلّص إلى حالةٍ من الانسحاق العظيم Big Crunch. وهكذا، فمن الوجهة العمليّة، علينا ألاّ نقلقَ من احتمال عكس الزمن لاتجاهه بمعنًى من المعاني، وأن يصبحَ غيرُ الطبيعيّ طبيعيًّا، وذلك عندما يبدأ الكونُ بالانهيار على نفسه، لكنّ العلماء يحبون استكشاف حدود الفكر، وعلينا أن نكون قادرين على فكّ الرابطة بين الأسئلة المتعلقة بالمستقبل الترموديناميّ للعالم وبين مستقبله الكسمولوجيّ. وبعبارةٍ أخرى، لنفترض أننا (نحن الكسمولوجيين) على خطأٍ فيما يتعلق بالمستقبل الطويل الأمد للعَالَمِ، وأنّ هذا العالَمَ سينهارُ فعلاً، ما الذي سيحدث إذ ذاك؟ هل سيصبحُ الطبيعيُّ غيرَ طبيعيٍّ، ويصبحُ غيرُ التلقائيِّ تلقائيًّا؟

إن الرياضيّ البريطانيّ، الواسعَ الخيال، روجر بنروز R. Penrose (وُلد عام 1931) فكّر بعمقٍ في انهيار العالم، وارتأى احتمال وجود إسهامٍ تجاذبي في الإنتروبيا. وبعبارةٍ أخرى، فقد تنشأ الفوضى من بنية الزمكان بدلاً من مجرّد ترتيبٍ غيرِ منهجيٍّ للأشياء التي تقطنه. إنه يَقْبَلُ بتفرُّدِ singularity اللحظةِ الابتدائيةِ، أي الانفجار العظيم Big Bang، لكنه يعتبر احتمالَ أن يكون تفرّدُ اللحظةِ النهائية، أي الانسحاق العظيم، نقطةً تتّسم بتعقيدٍ أبعد بكثير (الشكل 4-13)، وهكذا، فمع

أنّ المادة والطاقة في الكون المرئيّ ربما انضغطتا في أيامهما الأخيرة لتصبحا نقطة وحيدة، ومن ثم صار لهما إنتروبيا منخفضة بدرجة استثنائية، فإن بنية زمكانها التي تقطنان فيه هو من التعقيد بحيث أصبحت الفوضى في الكون أشد ممّا كانت عليه في لحظة خلقه الأولى. لذا فإن الإنتروبيا ستواصل تزايدها من الآن إلى اللانهاية، حتى لو كانت اللانهاية (أو، على الأقل، بعد مرور بضع عشرات البلايين من السنوات) ترانا عند الرجوع بالزمن إلى الوراء تفرّداً singularity.

ومهما كان عليه الحال، فإن أكبرَ احتمالٍ لمستقبل الكون هو توسّعه المتزايدُ وتعاظمُ مقياسِهِ بلا حدود. وفي هذا السيناريو، ثمة دوماً مجال أكبر للطاقة والمادة كي يتبدّدا. وحتى لو قُدِّر للمادة أن تضمحل متحولةً إلى إشعاع، فإن إنتروبيا الإشعاع ستتزايد تدريجياً مع تزايد الحجم الذي يشغله. ومع ذلك، فالمشكلة الحقيقية أنه إذا قُدِّرَ لكلِّ المادة أن تتحولَ إلى إشعاع، وأنْ يتمدّدَ الإشعاعُ، وتصبحَ أطوالهُ الموجيّةُ غيرَ منتهيةٍ، بحيث أنه لن يتبقى في المستقبل البعيد سوى زمكانٍ منبسطٍ ميّتٍ دون طاقةٍ، فإنه يبدو في الوهلة الأولى كما لو أن إنتروبيا الكون ستكون صفراً. بيد أنّ الفيزياء بالمقاييس الكسمولوجية للطول والزمن ما زالت موضوعاً مشكوكاً فيه، وقد يحدث أنه حتى وجود تبعثرٍ في تموّجاتِ كثافةِ الطاقةِ، في الحجمِ الهائلِ للكونِ الذي سيوجَد آنذاك، سيكونُ كافياً للتوثق من أنّ الإنتروبيا الكليةَ كبيرةٌ جدًّا. وهذا سؤالٌ مفتوح.

الشكل 4-13. حتى لو كنا متجهين إلى انسحاق عظيم Big Crunch، فعلينا ألاّ نتوقع من الإنتروبيا البدء بالتناقص ثانية مع بدء الكون بالتقلص. ويمكننا تصور وجود إسهام تجاذبي في الإنتروبيا، بمعنى أن التفرّد singularity النهائي (في اليمين) أعقد كثيراً من التفرد الابتدائي (في اليسار)، ومن ثم فإن إنتروبيا الكون تواصل تزايدها مع أنه يتقلص.

الجاذبية والإنتروبيا عشيقان مشهوران. وفي الوهلة الأولى، قد يُظَنُّ وجود رابطةٍ ضعيفةٍ بين نظرية النسبيّة العامّة ـ نظرية آينشتاين في الجاذبية (التي سنقابلها في الفصل 9) ـ والقانون الثاني، باستثناء احتمال وجود إسهامٍ تجاذبي في الإنتروبيا. بيْد أنّ ثمة حقيقةً مشهورةً تبرز عندما نبدأ بالتفكير ببنيةٍ الزمكان بلغة الإنتروبيا. وفي عام 1995، بيّن تِدْ جاكبسون T. Jacobson [9] أنه إذا دمجنا عبارة كلاوزيوس المتعلقَة بتغيّر الإنتروبيا حين تدخل الحرارةُ منطقةً، مع الإلحاح على علاقة الإنتروبيا بمساحة السطح الذي يحدّ المنطقة (في الحقيقة، الإنتروبيا والمساحة متناسبتان طردياً، وهذا معروف للسطح المحيط بثقب أسود)، فإن البنيةَ المحليَّة للزمكان تتشوّه بنفس الطريقة التي تنبأنا بها عن طريق معادلات آينشتاين في النسبية العامّة. وبعبارة أخرى، فإن القانون الثاني يقتضي وجود معادلات آينشتاين في النسبية العامة!

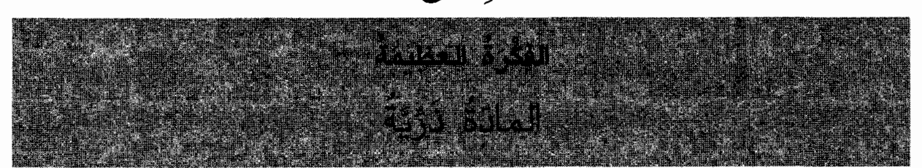
وهكذا، فربما لم يكن المحرّكُ البخاريُّ موجوداً داخلنا فقط، إنه موجودٌ في كلِّ مكانٍ.

(9) يمكن العثور على هذا البحث عن طريق الموقع http://xxx.lanl-gov والدليل الفرعي المسمى subdirectory gr.qc.

الفصل 5

الذرّات

اِخْتِزَالُ (إِرْجَاعُ) المادَّةِ



سأُميطُ اللِّثامَ عن تلكَ الذَّرَّاتِ التي تُوَلِّدُ منها الطبيعةُ الأشياءَ كلَّهَا
لُوقْرِيطُسْ

لقد سبق ورأينا المظاهرَ الخارجيَّةَ للتغيّرِ الذي جرى نتيجة نشوءِ المحيطِ (الغلافِ) الحيويِّ biosphere للأرض، والآليّاتِ الداخليّةَ لهذا التغيّرِ في الأساسِ الجزيئيِّ لعلم الوراثةِ. رأينا الشيءَ الذي لا يتغيّر، وهو الطاقة، ورأينا لماذا تتغيّر الأشياءُ بلغةِ الإنْتْرُوبِيا (القُصُورِ الحراريِّ) entropy، سنتفحَّصُ الآن الأساسَ الماديَّ للتغيُّرِ بتفصيلٍ واسعٍ، وبذا يمكننا إدراكُ كيفَ يحدث الانتقالُ من الفِيلَةِ إلى العناصر.

ما هو السِّرُّ الذي يُفشيه العِلْمُ عن طبيعةِ المادّةِ التي يتكوّن منها كلُّ شيءٍ محسوسٍ؟ سنحاولُ الإجابةَ عن هذا السؤالِ البالغِ الأهميةِ على مرحلتيْن اثنتيْن. ففي أولاهما، وهي موضوعُ هذا الفصلِ، سنعالجُ السؤالَ الذي سيتبيّنُ ـ لكنه لا يبدو في الوقتِ نفسِهِ ـ أنه من مستوىً سطحيٍّ، والذي يشرحُ نشوءَ مفهومِ الذَّرّةِ المتداوَلَةِ في جميعِ المواضيعِ التي يتناولها علمُ الكيمياءِ. وسنرى السببَ في امتلاك الذراتِ المختلفةِ شخصياتٍ مختلفةً نسمّيها خاصِّيَّاتٍ كيميائيَّةً chemical properties. لا تستبْعِدْ فِكْرَةَ أنّ هذا فصلٌ يتعلّق بعلم الكيمياء، إذْ إنّ الكيمياءَ هي الجسرُ بين عالَمِ الموادِّ الذي ندركه حسِّيًّا وبين عالَمِ الذرّاتِ الذي نتصوّره، وعلى الرّغم من

الذّكرياتِ ـ التي غالباً ما تكون مرعبةً ـ عن أوّل مواجهةٍ لنا مع الكيمياء في المدرسةِ، فإنها موضوعٌ غايةٌ في الروعةِ والجمالِ، ثُمَّ إنه مثيرٌ عقلياً حتى عندما نمرُّ عليه مرورَ الكرام (كما نفعل هنا) بدلاً من الغوْص في أعماقه. وأنا أنوي هنا تقديم قدرٍ ضئيلٍ من الكيمياء كي تفتحوا أعينكم على العالَمِ المحيطِ بكم، وكي أولِّدَ، لديكم، في الوقت نفسه، شعوراً عميقاً بسحر هذا الموضوع. أمّا في الفصل التالي، فسنتركُ الأمورَ السطحيّةَ المتعلّقةَ بالذرّاتِ لنغوص في أعمق بئر مفاهيم ما نسميه مادّةً. وسنتحرّكُ إذْ ذاكَ باتجاه فَهْمِ ما تعنيه المادةُ حقًّا، وذلك بأسلوبٍ ربّما حَصَلَ على رِضَا قدماءِ اليونانِ. فقد فكّر هؤلاء طويلاً فيما تكونُ عليه المادّةُ، وقدّموا فرضيّاتٍ جدَّ متنوّعةٍ تتعلّق بطبيعتِها، تُبَيِّنُ أنّ واحدةً منها، في الأقلّ، يُحتَمَلُ أن تكونَ صحيحةً. هذا وكان بعضُ اقتراحاتهم خاطئاً تماماً، لكنّه كشفَ عن روحٍ بحثيّةٍ جديرةٍ بالإجلالِ والإكبارِ. وهكذا فإنّ طاليسْ من مِيلاَطُسْ Thales of Miletus (500 ق. م. تقريباً)، الذي يُعْتَبَرُ في الذّاكرةِ الشعبيّةِ أبا الفلسفةِ، عندما عثر على أصدافٍ بحريّةٍ في أعالي الجبال، قفز، قبل وفاته بقليلٍ، إلى النتيجةِ القائلةِ إن كلَّ شيءٍ في هذا العالَمِ مكوّنٌ من الماء. وبعد ذلك بألف سنة، وردتْ هذه الفكرةُ نفسُهَا في القرآن[1]: ﴿وجَعَلْنَا من الماءِ كلَّ شَيْءٍ حَيٍّ أَفَلاَ يُؤْمِنُونَ﴾.

إنّ عظمةَ مصدرِ هذه الرؤيةِ ـ القرآن ـ من وجهة نظر البعض، يُضْفِي عليها قوةً مقنعةً حتى في هذه الأيام. بَيْدَ أنّ اليونانيين تابعوا مسيرتَهم للوصول إلى فهم الموضوع، واعتبروا أن مادةً وحيدةً غيرُ كافيةٍ لتفسيرِ تنوّعِ الموادِّ في العالَمِ. هذا وقد طوّر هيراقليطس من إِفِيسُسْ Heraclitus of Ephesus (540-475 ق. م. تقريباً) فكرة طاليس، إذْ ذَهَبَ إلى أنّ من الضروريّ وجودَ عاملٍ للتغيّرِ agent of change، وأضاف النّار إلى مجموعة العناصر الأساسيّة للموادّ. وسرعان ما ارتأى إمبيدوكليس Empedocles الصِّقلِّيُّ (492-432 ق. م. تقريباً) أنّ من الصّعب تكوُّنَ الموادِّ الصلبةِ من الماء والهواء والنّار فقط، ومن ثَمَّ لا بدّ من أنْ يُضافَ إلى هذا الخليطِ الترابُ، واقترحَ، وربّما آمن، بأنّ كلَّ شيءٍ يُمكن

(1) سورة الأنبياء، الآية 30.

المخطط الأيسر

ماء

معدن

تراب

خشب

نار

هواء

نار

رطوبة

جفاف

ماء

تراب

الشكل 5-1. جدولان دوريّان قديمان جدًّا للعناصر. يُبَيِّنُ المخطَّطُ الأيسرُ العناصرَ الأربعةَ التي يُفْتَرَضُ أنها أساسُ كلِّ الموادّ برأي قدماء اليونان؛ ويُبَيِّنُ أيضاً الخاصِّيّاتِ التي توفرها تلك العناصرُ للموادِّ التي تكوّنها. أما المخطَّطُ الأيمنُ فيقدّمُ تصوّراً حيثيًّا لها مبنيًّا على تعاليم الفلسفةِ الطّاويّةِ التي أسّسها لاوْتْسُو Lao Tsu (600 ق. م. تقريباً). يتضمّن هذا المخطَّطُ خمسةَ عناصرَ نَتَجَتْ من الصّراعِ بين يَانْكْ yang (ذَكَر، إيجابيّ، حارّ، منير) وَيِينْ yin (أنثى، سالبة، باردة، مظلمة).

أن يتكوَّنَ من الهواء والتراب والنار والماء (الشكل 5-1). وقد كان من المؤكّد تقريباً اطّلاعُ أرسطوطاليس (384-322 ق. م. تقريباً) على اختزال إمبيدوكليس للعالَمِ بعناصره الأربعة، وَحَاجَّ في أنّ عالَمَنَا الأرضـيَّ وهو مسرحُ التغيرُّ والاضمحلالِ، كان مختلفاً تماماً عن الكرةِ السماويّةِ الأبديّة، وأنّ عناصرَ إمبيدوكليس كانت ملائمةً للعالَمِ الأرضيِّ دون الكرةِ السماويّةِ. وفيما يتعلق بالكرة السماويّةِ السرمديّةِ الرّائعةِ، فقد ارتأى أرسطوطاليس ضرورةَ وجودِ مكوِّنٍ خامسٍ أساسيٍّ، هو الجوهر quintessence.

وبالطبع، فكلّ هذا كان خاطئاً لأنّ جميعَ هذه الموادّ لم تكن عنصريّةً، ربّما باستثناء جوهر السماوات الافتراضـيِّ، الذي لا يمكن التحقّقُ من وجودِهِ تجريبياً، والذي هو، كما نعلم، غيرُ موجودٍ، لكنّ صوغَ وتفسيرَ المفهومِ، الذي مفاده أنّ التعقيدَ ينشأ من البساطة، كان خطوةً مفاهيميّةً بالغةَ الأهميّة، ومازال هذا المفهومُ يكمن في صميم العِلْمِ الحديث.

إن افتراضَ وجودِ عناصرَ، وإنْ كانتْ العناصرُ المقترحَةُ خاطئةً، حَرَّضَ

على طرح السؤال الذي يكمن في قلب هذا الفصل وهو: هل المادّةُ مستمرّةٌ (متّصلةٌ) continuous أم مُتَقَطِّعَةٌ discrete؟ وبعبارة أخرى، أمِنَ الممكنِ تجزئةُ العناصرِ إلى ما لانهاية إلى أجزاءٍ أصغرَ، أمْ أنّ المادّةَ مُتَقَطِّعَةٌ، بمعنَى أنّ التجزئةَ ستُوصلنا في النهايةِ إلى شيءٍ لا يمكن تجزئتُهُ، ألاَ وهو الذّرّة؟ لما كان من المستحيل الإجابة عن هذا السؤال تجريبيًّا، فقد لجأ اليونانيون إلى التأمُّلِ والتخَيُّلِ، ومن ثَمَّ كان لكلٍّ من هاتين الفكرتيْن أنصارُهَا. إن تَبَيُّنَ صحّةٍ واحدةٍ من هاتين الفكرتيْن، وهي الفكرة الذّريّة، يجب ألاّ تقودنا بالضرورةِ إلى الإعجاب بمؤيّديها، ذلك أنّ دعمهم كان مؤسّساً على تخيّلاتٍ غريبةِ الأطوارِ وذوقٍ فلسفيٍّ، وكلاهما لا يُعْتَبَرُ الآن مكوِّناً موثوقاً تماماً للنّهج العلميّ أو للبحث عن الحقيقة.

بوسعنا تعقُّبُ مسارِ التأمّلِ المحظوظِ بالعودة زمنيًّا إلى الوراء وصولاً إلى لُوسِيبُوسْ من مِيلاَطُسْ Leucippus of Miletus (450-420 ق. م. تقريباً)، الذي تصوّر المادةَ حُبَيْبِيَّةً، وكأنها مكوّنةٌ من ذرّاتٍ تنتهي إليها عمليةُ تجزئة المادّة. وقد حاجّ لوسيبوس في أن المادّةَ لن تكون خالدةً إلاّ إذا كان ثمة نهايةٌ لعملية التجزئة، لأنه إذا لم نصلْ إلى هذه النهاية، لآلَ كلُّ شيءٍ إلى الزوال قبل زمنٍ طويل. ومع ذلك، فإن فكرته عن الذرّات كانت بعيدة جدًّا عما نعرفه اليوم عنها. وهكذا تصوّر أن للذرّاتِ مجموعةً واسعةَ التنوّعِ من الأشكال والحجوم، وأنّ ذراتِ كلِّ مادةٍ تختلف عن ذرات الموادّ الأخرى. فقد دُرِسَتْ هذه الفكرةُ بالتفصيل، وسُمِّيَتِ الأشياءُ التي لا يمكن تجزئتُها باللغة اليونانية atomos، وهذا يعني أنها لا يمكن تجزئتُهَا ولا تقسيمُهَا. وكان الذي أطلق هذه التسميةَ دِيمُقْرِيطُسْ من أبديرا Democritus of Abdera (350-322 ق. م. تقريباً)، الذي كان يُنْعَتُ «بالفيلسوفِ الضّاحِكِ». وقد اعتمدَ ديمقريطس الفكرةَ القائلةَ إنّ ثمةَ ذراتٍ لِلَّبَنِ الحليبِ، وذراتٍ للفحمِ، وذراتٍ للعظام، وذراتٍ للماء. لم يكن رأيُهُ معتمداً على التجربة، لذا ارتأى، أيضاً، وجودَ ذراتٍ للبصرِ والصّوتِ والرّوحِ. وقد رأى أن ذراتِ الرّوحِ جِدَّ لطيفةٍ، وأنها ملائمةٌ تماماً للرّوحِ، وأنها ذراتٌ بيضاءُ اللونِ وملساءُ ومستديرةُ الشّكلِ.

كانت هذه الأفكارُ جزءاً من منظومةِ معتقداتِ الإبِيقُورِيِّينَ، وهم أتباعُ

إبيقور Epicurus من ساموس (341-270 ق. م. تقريباً)، الذي استخدمهم للتصدّي لتلك الخرافةِ، وذلك بالقول إنه لمّا كانت كلُّ الأشياءِ، ومن ضمنها الآلهةُ، مكوَّنةً من ذرّاتٍ، فحتّى الآلهةُ ـ التي كان يُعتقد أنها لامباليةٌ، وأنها نماذجُ تبعث الشعورَ بالرّضا والطمأنينة، وتحتقِرُ كلُّ من لا يريدُ أن يزعجه أحدٌ بحضِّهِ على إصلاح شؤونِ الناس، حتى التافه منها ـ تخضع للقانون الطبيعيّ. هذا وإنّ النّظرَةَ الإبيقورية إلى العالَم ـ وهي نظرةٌ مبنيَّةٌ على دعامتيْن: مذهبِ المتعةِ، الذي يقول إنّ اللذّةَ هي الخيرُ الوحيدُ في العالَم، والمذهبِ الذّرّيِّ atomism، الذي يقول بأن العالَمَ مكوّنٌ من ذرّاتٍ ـ رأتْ في الإحساس أساسَ المعرفة، وأنّهُ الانطباعُ الذي يتولّد في الرّوحِ نتيجَة الصُّورِ المؤلَّفةِ من الأغشية الدقيقة للذرات التي تُصْدِرُهَا الأشياءُ التي يُحسُّ بها. وقد انتشرت هذه النّظرةُ الذريّةُ للبنيةِ والإحساسِ بين جمهورٍ رومانيٍّ متفتّحٍ عن طريق ملحمةٍ رائعةٍ جاء بها تيتو لُوقْرِيطُسْ كَارُوسْ Tito Lucretius Carus (95-55 ق.م. تقريباً) أوردها في كتابٍ عنوانه De rurum natura (طبيعة الأشياء)، يُعتَبَرُ أوّلَ كتابٍ مدرسيٍّ في الكيمياء الفيزيائيّةِ. وقد ظلّ هذا الكتابُ مفقوداً إلى القرنِ الخامسَ عَشَرَ، لكنّ إعادةَ اكتشافه شجّعت مزيداً من العقولِ الحديثةِ على العودةِ من جديدٍ إلى المذهبِ الذّرّيِّ.

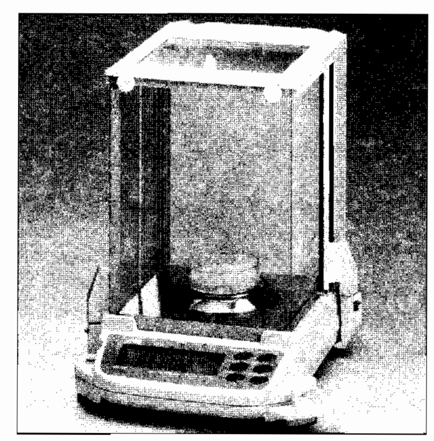
كان أفلاطونُ وتلميذُهُ أرسطوطاليس من أشدّ المعارضين للمذهب الذري، وكانت نظرتهم القويّةُ، وإنْ كانتْ فاسدةً، إلى العالَمِ هي المهيمنةَ في العصور الوسطى، وكان يعود ذلك، على الأقل، إلى الأثر القَويّ للمذهب الماديّ والإلحادِ اللّذيْن تتّسم بها الفلسفةُ الإبوقراطيّةُ. كانت وجهةُ نظرِ أرسطوطاليس أنّ المذهبَ الذرّيّ، الذي اعتبره مجرّدَ ابتداعٍ وتلفيقٍ ـ خلافاً لإبداعه ـ لا يستحقّ منا سوى الازدراء، وأنه لا يصلحُ لتفسير التجربة الحسّيّة الغنيَّة التي يتّسم بها العالَمُ الحقيقيّ. ثُم إنه كان يرى في الخلاءِ ـ الذي كان ضروريًّا إذا كان للذرّاتِ أنْ تتحرّكَ ـ لعنةً، لأنّ الفكرةَ، برأيه، لا يمكنها أن تَعْمَلَ في خلاءٍ، لأن الخلاءاتِ تفتقر إلى وسائلَ للدّفع، ولا يمكن للحركةِ أن تَحْدُثَ ما لم يَجْر دفعها (انظر الفصل 3).

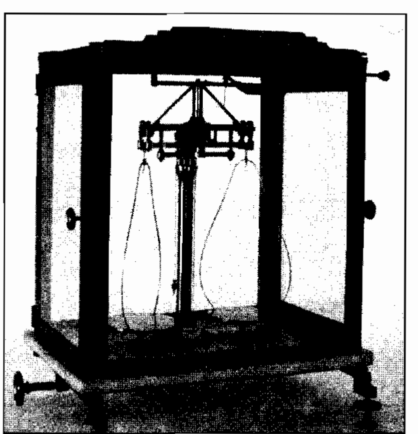
لقد كانت قوةُ نفوذِ أفكارِ أرسطوطاليس كبيرةً إلى درجةٍ أصبحتْ فيها أهمّ أركان الفهم البشري، بعد أن أُضيف إليها القليل من الأفكار الأخرى، طوال ألفي سنة. فقد سندت المشتغلين في الكيمياء القديمة (الخيميائيين) alchemists في مساعيهم المضلِّلةِ وغيرِ المثمرةِ. ثم إن وجهاتِ نظره في الحركةِ وقفت عائقاً في وجه تقدّم علم الفيزياء زمناً طويلاً. بعد ذلك، عندما استيقظ العالَمُ وكشف في القرن السابع عشر الخللَ الشديدَ الذي تعانيه الفيزياءُ التأمليَّةُ التي وضَعَ أسُسَهَا أرسطو، فإن هذه اليقظة حدثت لدى العاملين في الكيمياء، الذين اكتشفوا أيضاً سذاجة أفكاره الكيميائية. ومع أنه يمكننا من موقعنا الحاليِّ أن نَسْخَرَ من التّراث الفكريّ الذي خلّفه أرسطوطاليس ـ وما يدعم ذلك هو حدوثُ كثيرٍ من الثورات التي أبعدتْنا عن فِكْرِهِ ـ فعلينا ألا نغيِّرَ توجيه مديحنا إلى الإبيقوريِّين، حتى لو ظهروا، في الوهلة الأولى، أنهم أقرب إلى الحقيقة. كان الإبيقوريون يعتمدون التأمّلُ والتصَوُّرَ أيضاً، وكان مذهبُهم الذريُّ مستنداً إلى التأمّلِ، بنفسِ القوةِ التي استعملها أرسطوطاليس للتأمل في مذهبه المضادِّ للمذهب الذريّ. لقد كانت جميعُ الفرضيّاتِ المبكّرةِ المتعلقةِ بالذراتِ تخمينيّةً صرفةً: كانتْ كلُّها فلسفةً تأمليّةً، لا عِلْماً.

●

كان الوقتُ، الذي استغرقه العلمُ للتوصّل إلى معرفة طبيعةِ المادةِ، أطولَ من الوقتِ الذي تطلّبَه لتعرُّفِ حركةِ المادّةِ. هذا وإنّ طبيعةَ المحسوس ذاته كانت مضلِّلَةً أكثر من حركة ذلك المحسوسِ عبر الفضاء، إذْ إنّ من السهولة بمكانٍ ربطَ الأعدادِ بالمكان والزمان، في حين أنه ليس من الواضح البتّةَ ربطُهَا بالخّاصيّاتِ التي يعتمدها عموماً الكيميائيون للمادّة. فهل لم تكن طبيعة المادة أكثرَ من مجرّدِ تأمّلاتٍ؟

لقد تبيّن أنّ الميزان يوفّر مفتاحاً لحلِّ اللّغْزِ (الشكل 5-2). ففي يديْ أنطوان لُورَانْ دو لافوازييه A. L. de Lavoisier (1743-1794)، الذي يُعتَبَرُ على نطاقٍ واسعٍ أبَ الكيمياء الحديثة، أصبح الميزانُ مِبْضَعاً يمكن استعمالُهُ للوُلوجِ في أعماق أسرار المادّة. وبشيءٍ من التّروِّي والتفكيرِ، أمكن استعمالُ الميزان





الشكل 5-2. ميزانٌ كيميائيٌّ تقليديٌّ شبيهٌ بذاك الذي استعمله لافوازييه في بحوثه التي سمحت له بربط الأعداد بالمادّة، ومن ثَمَّ تحويل الكيمياء إلى علمٍ فيزيائيٍّ، ويظهر في اليمين النظيرُ الحديثُ لميزان لافوازييه.

لربطِ الأعدادِ بالمادّةِ، وإحضارِ التفاعلاتِ الكيميائية إلى مملكةِ عِلْمِ الحِسابِ. وبوجهٍ خاصٍّ، أَمْكَنَ استعمالُهُ لتحديد كُتَلِ الموادّ التي تتفاعَلُ معاً. ونتيجةً لذلك، بدأتْ تَرِدُ نماذجُ patterns في المعطيات (البيانات) data، وكما سبق ورأينا، فإن النماذجَ هي دمُ حياةِ العِلْمِ، وبذورُ النظريّات.

كان نموذجُ كتلِ العناصِر التي تَتَّحِدُ معاً هو الثمرةَ التي نَمَتْ على شجرة الفرضيّةِ الذّرّيّةِ atomic hypothesis لدالتون. كان جون دالون J. Dalton (1766-1844) ابناً عنيداً، ومصاباً بعمَى الألوانِ، لحائكٍ على نَوْلٍ يدوي؛ وقد عَمِلَ معلِّماً في إحدى المدارس وهو لمّا يتجاوزِ الثانيةَ عشْرةَ من عُمُرِهِ، وكان أيضاً راصداً للطّقس يتّسم بشدّةِ التدقيقِ في التفاصيلِ، ولمْ يكنْ له تسليةٌ يرفّهُ بها عن نفسه سوى لعبة البُولِنْغْ التي يمارسُها مساءَ كلِّ يومِ خميسٍ. وربّما كانت ذاكرتُهُ اللاّواعيةُ لتلك الطابات هي التي أوحتْ إليه بالنظريةِ التي قدَّمها أوَّلَ مرّةٍ في محاضرةٍ ألقاها في المعهدِ الملكيِّ Royal Institution في كانون الأول/ ديسمبر عام 1803، ثم نُشِرَتْ عام 1807. وكانت تنصُّ فرضيَّتُهُ على أنّ المادّةَ مكوَّنةٌ من ذراتٍ لا يمكن توليدُهَا ولا تدميرُهَا، وأنّ جميعَ ذرّاتِ عنصرٍ معطىً

متطابقةٌ، وأن كلَّ ما تفعله الذراتُ في تفاعلٍ كيميائيٍّ هو تغييرُ شركائها. كان مفهومُهُ الحاسِمُ أنه يوجَدُ لكلِّ ذرّةٍ كتلةٌ تميِّزهَا، ومن ثَمَّ فإن الميزانَ الكيميائيَّ هو راصِدٌ للتغيرات في الكتلةِ التي تحدث عندما تغيّر الذرات شركاءها. وهذه هي الخطوة التي يسمّيها فلاسفةُ العلومِ الانتقالَ من الماكرويِّ إلى المكرويِّ tansduction، الذي يكون فيه مفهومٌ على مستوىً مِجْهَرِيٍّ (مكروسكوبيٍّ) microscopic مرتبطاً بخاصيّةٍ عيانيّة (ماكروسكوبيةٍ) macroscopic قابلةٍ للرصد. هذا وإن معظم علمي الفيزياءِ والكيمياءِ الحديثيْن ليس سوى تفصيلٍ لنقل الماكرويّ إلى مكرويٍّ، حيث يُتَرْجَمُ المرصودُ إلى المُتَخَيَّلِ، وبوجهٍ خاصٍّ، تُتَرْجَمُ القياساتُ التي تُجرَى بمقياسٍ بشريٍّ إلى قياساتٍ أصغرَ ببلايين المرّات.

وفي الحقيقة، سار دالتون شوطاً أبعدَ ممّا نعتبره الآن شيئاً يريحنا تذكُّرُهُ. فقد عَدَّ ذرّاتِ العناصرِ المختلفةِ محاطةً بمقاديرَ مختلفةٍ من السمائع الحراري (الكالوريك) caloric، وهو ذلك المائعُ الافتراضيُّ غيرُ القابلِ للوزنِ الذي نعتبرُهُ حرارةً (الفصل 3). وقد ارتأى أن لذرّاتِ العناصرِ الغازيّةِ أثخنَ مائع حراريّ، وهو يمكِّنها من الحركةِ بحرِّيَّةٍ. أمّا ذراتُ العناصرِ الصّلبةِ فلها أرقُّ الموائع، وهذا يعني أنها تبقى مستقرّةً في مواقعها. وتجدرُ الإشارة إلى أنّ هذا الابتعادَ، المذهلَ إلى حدٍّ ما، عن الفكرة المركزيّةِ للفرضيّة الذريةِ، قد نُسِيَ تماماً[2].

وخلال استعمالِ دالتون لميزانِهِ، استطاعَ إعدادَ جدولٍ يحتوي على كُتَلِ ذرّاتِهِ بالنسبة إلى كتلة ذرّةِ الهيدروجين - أخفِّ العناصرِ - التي اقترض كتلتَها 1. وقد أَطلقَ على هذه الكتلِ الذريّةِ النسبيّةِ اسمَ الأوزانِ الذّرّيّةِ atomic weights، وما زال هذا الاسمُ مستعمَلاً حتى الآن. كانت تجاربُه غيرَ متقَنَةٍ، وكان تفسيرُه لها يعتمدُ على فرضياتٍ تتعلّق بعددِ الذّرّاتِ في عنصرٍ ما، التي تتّحد مع ذراتِ عنصرٍ آخرَ، وهنا كانت تخميناتُهُ خاطئةً في معظمها (الشكل 3-

(2) من العجيب، إلى حدّ ما، أن معظم مكوِّنات فرضية دالتون الذرية كانت خاطئة بعيون المتحذلقين، الذين كان أقل ما يقولونه إن السيالة المائع الحرارية غير موجودة. يمكننا عَمَلُ ذراتٍ وتدميرها (لكنْ في غير التفاعلات الكيميائية). ولا يوجد كتلة واحدة بالضبط لجميع ذرات عنصرٍ ما (فكتل النظائر isotopes يختلف بعضها عن بعضٍ قليلاً). لكن روح هذه الفرضية صحيحة، وهي جديرة بالاحترام.

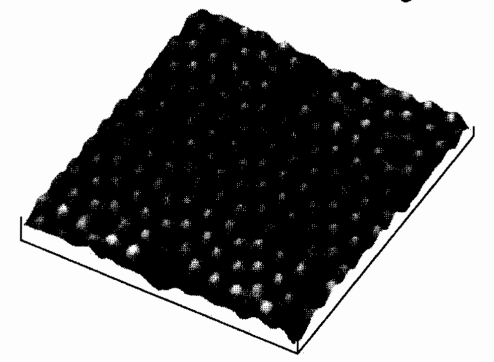
5). وهكذا، فباعتمادهِ البساطةَ منهجاً، افترضَ أنّ الماءَ مكوَّنٌ من ذرّةٍ واحدةٍ من الأكسجين وذرةٍ واحدةٍ من الهيدروجين، واستنتج أنّ الوزنَ الذّرّيَّ للأكسجين 7 (وفي الحقيقة، فإن المعطياتِ التي هي أكثرُ دقّةً. تعطي العددَ 8 باستعمال طريقته في التفكير)؛ ونحن نعلم أنّ الماءَ مكوَّنٌ في الحقيقة من ذرّتيْ هيدروجينٍ وذرّةِ أكسجينٍ، لذا فإن الوزن الذريَّ الحقيقيَّ للأكسجين هو 16؛ أي أن ذرّةَ أكسجينٍ أثقل 16 مرّة من ذرة هيدروجينٍ. هذا وَتَرَوْنَ هنا أقدمَ نموذجٍ لتحويل الماكروي إلى مكروي بكل عظمته، حيث أظهرت الملاحظاتُ في المختبر خاصياتِ ما لا يُمكن رؤيتُهُ.



الشكل 5-3. ظهرت فرضيّةُ دالتون الذريّةُ في السنوات الأولى من القرن التاسع عشر. وقد ألقَى عدةَ محاضراتٍ تتعلّق بها في كثيرٍ من المناسباتِ. وهذه صورةٌ طبقُ الأصْلِ لجزءٍ من البياناتِ التي قدّمها في محاضرةٍ أُلقيت في 19 تشرين الأول/أكتوبر عام 1835 على أعضاء معهد علم الميكانيك في مانشستر. إن رموزَ العناصر، المطبوعةَ طباعةً سيّئةً، استُبْدِلَ بها رموزٌ أصحُ إملائيًّا، وهذا سبّبَ إزعاجاً شديداً لدالتون.

وخلافاً لتخمينات اليونانيين فيما يتعلق بالطبيعة الذرّيّة للمادة، فقد كانت تخمينات دالتون نظريةً علميّةً؛ لم يكنْ ذلك استغراقاً في التفكير يتّسم بالتراخي والكسل، ولا حتى بالنّشاط، بل كان نتيجةَ ملاحظاتٍ تستند إلى التجربة المتحالفةِ مع إعْمَالِ العقْلِ. ومع ذلك، لم يقبلِ هذه النظريةَ الجميعُ بوصفها سمةً للواقع. وطوال عدة سنوات، كانت تعني هذه الفكرةُ للعلماء أن الذرّاتِ رموزٌ مفيدةٌ لإجراء الحسابات التي تتعلّق بالكتل، لكنّها ليست شيئاً واقعيًّا بأي معنًى من المعاني. لكنّ معظم المعارضة اخْتَفَتْ عام 1858 تقريباً، عندما نشر عالِمُ الكيمياء، والثائرُ الإيطاليُّ سْتَانِيسْلاَوْ كانيزّارو (1826-1910) S. Cannizzaro جدولاً أكثرَ دقّةً بكثيرٍ للأوزان الذَّرِّيَّةِ للعناصرِ المعروفةِ، ومع ذلك، فقد ظلَّ بعضُ العنيدين، حتى بحلول عَجُزِ القرنِ التاسعَ عشرَ، معارضين للنظريةِ الذريّةِ.

وقد تدخّلت التقنيّاتُ الحديثةُ المستعمَلَةُ في الرّصدِ في الحكْمِ على صحّةِ الحُجَجِ التي كان يقدّمها دالتون والعلماءُ الذين أَتَوْا بعدَهُ مباشرةً. والآن، يمكننا رؤيةُ الذّرّاتِ على شكلِ نقاطٍ منفصلةٍ من المادّةِ (الشكل 4-5)، ولم يَعُدْ ثَمَّةَ أيُّ شكٍّ في وجودِهَا. وبالطبع، قد يعترضُ بعض المتحذلقين المغرِقين في التشاؤم



الشكل 4-5. استنتج دالتون وجود الذرات من وجود تناسقٍ وانتظامٍ في كتل العناصر التي اتحد بعضها ببعض. والآن، يمكننا «رؤيتها»، ولا يوجد شك في وجودها. الجهازُ، الذي استُعمِل للحصول على هذه الصورة لذرات السليكون على سطح قطعة من السليكون، يُسمَّى مجهراً نَفَقِيًّا ماسحاً Scanning tunnelling microscope (STM). هذا الجهاز يتحسّس، بدقة كاملة تقريباً، طريقه عبر سطحٍ ما، وتقوم الحواسيب بتحويل الإشارات التي يبعث بها المجسُّ إلى صورةٍ تتّسم بِمَيْزٍ (قوةِ فَصْلٍ) resolution ذي مقياسٍ ذرّي.

بقولهم إن الأجهزةَ التي استُعمِلَتْ للحصولِ على هذه الصّورِ ليستْ سوى بدعةٍ عقليّةٍ، إذْ صُمِّمَتْ تلك الأجهزةُ للتعبير عن النموذجِ الذي يريد العلماءُ الحصولَ عليه؛ لكنّ العلماءَ يعرفون أفضل من ذلك.

●

إنَنْ، ما هي الذرات؟ وما هو شكلُهَا؟ وكيف تُكَوَّنُ؟ سَلَّمَ دالتون، مثل اليونانيين، بأنّ الذراتِ هي ما تتوقف عنده التجزيء، وأنها لا يمكن أن تخضع لمزيدٍ من التجزئي، بمعنى أنه لا يوجد للذرةِ مكوِّناتٌ أصغرُ منها. لكنْ إذا كان الأمرُ كذلكَ، فمن الصّعبِ رؤيةُ كيف يمكن شرح الخاصِّيَّاتِ الغنيّةِ للعناصر، لأن تنوُّعَ الخاصِّيَّاتِ يَنشأ من غِنَى التركيب. هذا وقد كان أولّ من أثبت أنه يوجد حقًّا للذرات بنيةٌ داخليّةٌ هو ج. ج. طومسون J. J. Thomson (1856-1940)، الذي بَيَّنَ عام 1897 أنّ من الممكن فَصْلُ الإلكترونات من الذرات. وقد أَعْلَنَ اكتشافَهُ هذا في المعهد الملكي Royal Institution بتاريخ 30 نيسان/إبريل عام 1897. كانت الإلكترونات أُولَى الجسيمات دون الذرية subatomic particles، وهي جسيماتٌ أصغر من الذرات، يجري تعرّفُها. وقد أثبتت بحوثُ طومسون في مختبرِ كافنديش بجامعة كيمبردج أنها كانت مكوِّناً عامًّا لجميع الموادِّ، ومن ثَمّ فإن للذراتِ، في الواقعِ، تركيباً داخليًّا.

وفي السنوات الأخيرة من القرن التاسع عشر، حدث ارتباكٌ شديد فيما يتعلق بكيفية ترتيب الإلكترونات، ورأى البعضُ أنّ من الممكن أن تحدي ذرّةٌ وحيدةٌ آلافَ الإلكترونات، ولم يكن ثمة أيّةُ معلوماتٍ عن وجود جسيماتٍ ذاتِ شحنةٍ موجبةٍ لِتُعَادِلَ الشَّحْنَةَ الكهربائيةَ السالبةَ للإلكتروناتِ. وقد حُلَّتْ هذه المشكلةُ بفضل بحوث إرنست رذرفوردْ E. Rutherford (اللورد رذرفورد أوف نلسون، 1871-1937) النيوزيلانديّ، الذي تابع بحوثَهُ بعد ذلك في مانشستر، والذي توصّل عام 1910 إلى وجود النَّواةِ nucleus، وهي بقعةٌ بالغة الصغر مكوَّنةٌ من مادةٍ مشحونةٍ إيجاباً تقعُ في مركز الذّرّة، ومع أن

النَّواةَ أصغرُ كثيراً من الذرّةِ نفسِها، فإنّها هي التي تكوِّنُ، عمليًّا، الكتلة[3] الإجماليّةَ للذرّةِ.

بعد ذلك، كان لا بد من تكوين انطباعٍ عن حجومٍ وكُتَلِ الأشياء المختلفةِ التي برزتْ على المسرح. للذرّةِ النموذجيّةِ قطرٌ يساوي زهاءَ 0.3 من البليون من المتر ($3x10^{-10}$ متر، 0.3 نانومتر). لذا فإن عشرة ملايين من هذه الذّراتِ الموضوعةِ بالتتابعِ على خطٍّ مستقيمٍ لن تشغَلَ من طوله سوى 3 مليمترات، أي أنها ستكون بطول هذه الشَّرْطَةِ (القاطِعَةِ) ـ قد تكون قادراً على تصوّرِ حجمِ هذه الذرات. وقد يكون من الأسهل تصوُّرُ تكبيرٍ لهذه الشَّرْطَةِ إلى أنْ يصبحَ طولُهَا 3 كيلومترات، وفي هذه الحالة، يكون قطرُ كلِّ ذرةٍ قرابة 3 مليمترات.

هذا وإنّ الذراتِ كبيرةٌ جدًّا: والحقيقةُ أنها يجب أن تكون كذلك، لأنها تحوي كثيراً من الأشياء داخلَها. ويظن معظمُ الناس أن الذّرّاتِ صغيرةٌ جداً، السّببُ في ذلك هو أننا نملكُ أجساماً كبيرةً جدًّا ويجب أن نكون كذلك، لأنّ أشياءَ كثيرةً جدًّا موجودةٌ داخلَنَا. فإذا بَدَأْتَ بالتفكير في أنّ الذرّاتِ كبيرةٌ، فإنها تصبحُ أقلَّ ترويعاً. وممّا يساعدنا هو تضخيم ذرةٍ في خيالنا إلى أن يغدو قطرها قريباً من المتر.

نواةُ الذرّةِ كبيرةٌ أيضاً، لأنها، أيضاً، تحوي كثيراً من الأشياء محشوّةً داخلَهَا. ويظنّ معظمُ النّاسِ أنها صغيرةٌ جدًّا جدًّا؛ لكنّ هذا لن يساعدنا في فهمنا الإجمالي للذرّة، لأن مثل هذه الأفكار تعيق قدرة العقل على تصوّر شكلها. وقد يظنّ بعضُ العلماء أنّ هذه الإعانة شيء جيد جدًّا، لأنّ استيرادَ الأفكارِ الماكروسكوبيةِ إلى أشياءَ صغيرةٍ مثل الذرّات ـ هذا إذا تجاوزنا نَوَاهَا ـ هو عمليّةٌ محفوفةٌ بالخطر، لأن المفاهيمَ المألوفةَ لا تسري على أشياءَ بهذه الدرجة من الصِّغَرِ (كما سنرى في النظرية الكوانتية في الفصل 7). وبالرغم من ذلك، لِنُحَاوِلْ، على الأقل، تصوُّرَ قطرِ نواةٍ. تُبَيِّنُ التجاربُ أنّ قطرَ النّواةِ يساوي زهاءَ واحدٍ من عشرةِ آلافٍ من قطر الذرة. لذا إذا تخيلنا أن الذرّةَ كرةٌ قطرُها قرابة

(3) كان رادرفورد أوّلَ من استعمل مصطلح «nucleus» (النّواة) عام 1912.

مترٍ، فلن تكونَ نواتُهَا سوى لطخةٍ صغيرةٍ جدًّا قطرُها عُشْرُ المليمتر. وهكذا فإن النّواةَ بالنسبة إلينا، نحن المخلوقاتِ البشريةَ الثقيلةَ التي تُعْوِزُهَا الرشاقةُ، صغيرةٌ جدًّا حقًّا؛ وحتّى بالنسبة إلى شيءٍ بحجم الذّرّة، فستبدو النّواةُ بالغةَ الصِّغَرِ أيضاً، لكنّها قابلةٌ لأنْ تُدْرَكَ وتميَّزَ. وعندما يكون عالِمٌ في الفيزياء النوويةِ بحاجةٍ إلى التأمُّلِ في تركيبِ النَّوَى، فإنه يرى النواة كبيرةً إلى حدٍّ ما.

وكما سبق وقلنا، فإن النَّوَى كبيرةٌ لأنّ ثمة أشياءَ كثيرةً مَحْشوّةٌ داخلَهَا. ففيها الجزء الذي تستقرّ فيه الشّحنةُ الإيجابيةُ للذرة، التي تُلغِي الشحنة السلبية للإلكتروناتِ المحيطةِ بها. وفيها، أيضاً، مُسْتَقَرُّ الكتلةِ الكلِّيَّةِ، تقريباً، للذرة، لأنّ الإلكتروناتِ لا تمثِّل سوى نحو 0.1 بالمئة من كتلةِ أيِّ شيء. وعندما تحملُ جسماً ثقيلاً، فإن الثِّقلَ الذي تشعرُ به هو، عمليًّا، وزنُ النَّوَى. ولو كان بالإمكان استبعاد جميع النَّوى من ذرّاتِ جسمِكَ، لغدا وزنُكَ قرابةَ 20 غراماً فقط. وثمة سمةٌ أخرى للنّوى، معروفةٌ بدرجةٍ أقل من غيرها، هي أنّ كثيراً منها تُدَوِّمُ حول محاورها، لكنّ بعضَها لا يفعل ذلك. فنوى الهيدروجين والنتروجين تدوِّم؛ لكن نوى الكربونِ والأكسجين فلا. هذا ولا يمكن تغييرُ تدويمِ نواةٍ، ذلك أنه سمةٌ مميِّزةٌ لخاصيّاتها، كالشحنةِ السلبيّة للإلكترون، لذا، لا بدّ لنواة الهيدروجين أن تدوِّم أبداً بسرعةِ دورانٍ ثابتةٍ لا يمكن تغييرها.

لقد تبيّن في بواكير القرن العشرين أن الإلكترونَ لم يكن أوّلَ جسيمٍ دون ذريٍّ subatomic جرى اكتشافُهُ. فقد اكتُشف أوّلُ إلكترونٍ دون أن يُعرَف أنه إلكترونٌ حقًّا، طوال أكثر من قرنٍ. وتتألف نواة ذرة الأكسجين، وهي أبسط جميع الذرات، من جسيمٍ دون ذريٍّ وحيدٍ هو البروتون proton. وهذا الجسيمُ هو المسؤولُ عن خاصِّيَّاتِ الحوض، وعندما يتذوّق لسانُكَ شدَّةَ حموضةِ عصيرِ اللّيمونِ؛ فلأن البروتونات تَسُودُ العصيرَ. وللأسف، فلن نستكشفَ هذه السمةَ هنا، أو نعرفَ السببَ في أن اللّسانَ هو كاشِفٌ جيد لنوعٍ واحدٍ، على الأقّل، من الجسيماتِ الأساسيّة. البروتون هو جسيمٌ ثقيلٌ ذو شحنةٍ إيجابيةٍ مساويةٍ ومضادّةٍ لشحنة الإلكترون: وكتلته أكبر من كتلة الإلكترون بنحو ألْفَيْ مرّةٍ.

تتكوّن ذرّةُ الهيدروجين من بروتونٍ وحيدٍ ومن إلكترونٍ يرافقه: وتقوم الشحنةُ الإيجابيّةُ للنواة بإلغاء الشحنةِ السلبيّةِ للإلكترون[4]. إن للعنصر، الذي يشغل المرتبة الثانية في البساطة، وهو الهليوم، نواةً مكوّنةً من بروتونيْنِ، لذا يرافق النواةَ إلكترونان. يُسمّى عددُ البروتوناتِ في نواةِ ذرّةِ عنصرٍ العددَ الذريَّ atomic number للعنصر، لذا فالعدد الذري للهيدروجين هو 1، وللهليوم 2، وهكذا، وكي تكون الذرّةُ متعادلةً كهربائيًّا، وهذا هو حال جميع الذّرّاتِ، يجب أن يكون عددُ الإلكتروناتِ الموجودةِ مساوياً للعدد الذري، لأنّ الشحنةَ الإيجابيّةَ الكليةَ للنّواةِ تلغيها الشحنةُ السلبيةُ الكلية للإلكتروناتِ المرافقةِ.

إنّ التحقّقَ من أنه يمكن نَسْبُ عددٍ إلى نواةِ عنصرٍ، وأنّ ذلك العدَدَ يمكن ترجمته إلى حقيقةٍ تتعلق بتركيب النواة، يعني أنّ من الممكنِ أخيراً إعدادَ جدولٍ تَفَقُّدٍ للعناصرِ. وفي حال غيابِ عنصرٍ، فمن الممكن تعرّفُهُ عندما نعثر على عنصرٍ له ذلك العددُ الذريُّ الخاصُّ، ثم إنّ التوقّعاتِ المتعلقةَ بوجود عنصرٍ بين عنصريْن آخريْن، يمكن استبعادُهَا إذا كان عدداهما الذرّيّان متجاوريْن، وقد خضعت الأعدادُ الذريّةُ للتعيين تجريبيًّا بواسطةِ تقنيةٍ ابتكرها هنري موسلي H. Moseley (1915-1887)، وذلك بعد وقتٍ قصيرٍ من استدعائه لتأدية خدمته العسكرية الإلزاميّة التي انتهتْ بسقوطه قتيلاً برصاصةِ قنّاصٍ في كالِيبُولي. وقد كتب ويلفريد أُوِينْ W. Owen قبل إصابته برصاصةٍ عشيّة أُفُولِ الحربِ نفسِهَا (الحرب العالميّة الأولى) البيتيْن التّاليَيْن:

كنتُ أملكُ الشجاعةَ، وقد بلغْتُ في كتمانِهَا مرتبةَ الرّيادة
وكنتُ أملكُ الحكمةَ، وقد ارْتَقَيْتُ بها إلى التّفوّق والسّيادة

لقد كان هذا حقًّا تفوّقاً مستنداً إلى حكمةٍ بدّدتْ شجاعةَ كتمانِ السِّرِّ، لأننا

(4) لكلِّ النّوى، باستثناء نواة الهيدروجين، جسيمٌ تحت ذرّي آخر: إنّه النيوترون neutron، وهو أحدُ أقرباء البروتون، لكنْ ليس له شحنةٌ إيجابية. هذا وإن البروتونات والنيوترونات هي التي تكوّن معاً كتلةَ النواةِ، ومن ثم معظمَ كتلةِ المادّةِ.

نعرف اليومَ جدولَ تفقُّد العناصر، ووجودَ النَّوى، وعددَ الإلكتروناتِ الموجودةِ في كلِّ ذرَّةٍ.

●

كان الترتيبُ الدقيقُ للإلكترونات حول النواة يمثِّلُ مشكلةً. والنقطة التي علينا فهمُهَا في هذه المرحلةِ من المناقشةِ هي أنّ الذرّةَ فضاءٌ خاوٍ تماماً تقريباً. فالكتلة الكلِّيَّةُ للذرّةِ، كما سبق ورأينا، هي كتلة النّواةِ المركزيّةِ البالغةِ الصِّغرِ، التي يحيطُ بها فضاءٌ قطْره أكبرُ بنحو عشرة آلاف مرّة من قطر النواة، وهذا الفضاء هو الذي يحوى بضعة إلكتروناتٍ - وهي ستةٌ، مثلاً، في حالة الكربون. وَجَسَدُكَ هو فضاءٌ فارغٌ تقريباً، لكنّكَ تبدو ضخماً إلى حدٍّ ما. وبمعنًى حقيقيٍّ، وبعيداً عن التهكُّم، فإنك فراغ يفكِّرُ بدماغٍ فارغٍ تقريباً، ويرتدي لباساً فارغاً، وتأكُلُ فراغاً، وتجلسُ على فراغٍ. ولِتَصَوُّرِ هذا الفراغِ المتعلِّقِ بالذرّةِ، تَخَيَّلْ نفسَكَ واقفاً على نواةٍ بحجم الكرة الأرضية، موجّهاً نَظَرك شَطْرَ سماءٍ ليليةٍ صافيةٍ مرصَّعةٍ بالنجوم. إنّ فراغَ الفضاء الذي تراهُ حولَكَ لا يختلف عن فراغِ ذرةٍ موجودةٍ فيكَ.

ومع ذلك، فالفراغُ فوقَ النّوويِّ extranuclear هو جوهرُ شخصيةِ العنصرِ. وفي حين تمثِّل النّواةُ متفرِّجاً سلبيًّا مسؤوليتُهُ مقصورةٌ على تنظيمِ الإلكتروناتِ التي تدور حوله، وتمثل أيضاً مركزاً للتحكّم، فإنّ حفنةَ الإلكتروناتِ التي تَشْغَلُ فضاءً خالياً تقريباً هي المشاركةُ في التفاعلات الكيميائية.

لم يستطع العلماء مقاومة الإغراء بافتراض أنّ الإلكتروناتِ هي بمثابةِ كواكبَ تدور حول نجمها - النّواة - أو بمثابة قمرٍ حولَ الأرضِ، ومازالتْ هذه الصورةُ قويّةً، وهي الفُضْلَى، لو لم أنكرها. وقد اقترح النموذجَ الكوكبيَّ «الزُّحَلِيَّ» للذرّةِ الفيزيائيُّ اليابانيُّ هَنْتَارُو نَاغَاوُوكا (1950-1965) H. Nagaoka عام 1904، وغدا نموذجاً طبيعيًّا افتُرِضَ نتيجةً لاكتشافِ رذرفورد للنّواة الذي حدث بعد ستّ سنواتٍ. إن النّموذَج الكوكبيَّ، الذي يُفْهَمُ الآن أنه كواكبُ تدور

حول نجمٍ مركزيٍّ بدلاً من حلقات نَاغَاووُكَا حول زحل، دبّتْ فيه الحياة عام 1912 عندما اعتمد نِيلْزْ بُورْ N. Bohr نموذجاً مبكّراً للنظرية الكوانتية (الكمومية) التي تصف حركة إلكترونٍ وحيدٍ في ذرةٍ هيدروجينية، وقدّم حساباً كمِّيًّا ناجحاً لِطَيْفِ الذّرّةِ. ولا يسع المرء إلاّ أن يتوقّعَ البهجةَ العارمةَ التي سَرَتْ في أعماقِ بُورْ عندما توصّلتْ حساباتُهُ إلى نتائجَ تتّفقُ تماماً تقريباً مع نتائج الرّصد.

لكنّ ذلك ـ النموذج الكوكبي، وحساب بور الذي يبدو دَاعِماً ومتقَناً ـ كان خاطئاً. وفي هذا درسان لِلْعِلْمِ والحياةِ عموماً. أولاً، لا يمكن الانتقال بثقةٍ، دون اتخاذ قدر كبير من الحيطة والحذر، من الأجسامِ الماكروسكوبيّةِ المألوفة إلى أجسامٍ مكروسكوبيّةٍ غير معروفةٍ. فالتِّنِّينَاتُ dragons تملأ العالَمَ السُّفْليَّ من الحقيقة. ثانياً، يمكن حتى للتوافق الكمِّيِّ أنْ يكونَ، في ظروفٍ خاصّةٍ، حَكَماً فاسداً عند الفصْل في خلافٍ يتعلّق بالحقيقةِ. الظّروفُ الخاصّةُ، التي أفسدتِ الحَكَمَ في هذه الحالة، هي الجمالُ ـ بالمعنى الذي سنورده في الفصل التالي، لكننا نستعمل هذا المصطلح الآن بإبهامٍ وغموضٍ ـ الذي يتميّز به السَّحْبُ الكهربائيُّ electric pull الذي تمارسه النواةُ على إلكترونٍ.

يجب عليك أن تطردَ من عقلِكَ الواعي، بل ـ وهذا أفضل ـ من عقلك غير الواعي صورةَ الكواكبِ التي تدور حول نواةٍ مركزيةٍ: فهذا، بكلِّ بساطةٍ، خطأٌ. إنه نموذجٌ زائفٌ للذرّةِ؛ إنه نوعٌ من الخيال العلميِّ، وهو نموذجٌ ميّتٌ منبوذٌ. أصلُ هذا الغلط هو تحقُّقُنا أن الإلكترونات ليست جسيماتٍ بالمعنى المألوف، بل إن لها طبيعةً جوهريةً شبيهةً بالموجة. إن هذه السِّمةَ الثنائيّة تشغَلُ مكانَ القلبِ في النظريةِ الكوانيّةِ، وهذا ما سندرسه في الفصل 7، حيث يُلغى مفهومَ المدار، الذي هو في هذه الحالة، الطريقُ المداريُّ للإلكترونِ الكوكبيِّ حول نواةٍ مركزيةٍ شبيهةٍ بنجمٍ، وهذا يقتضي أنه من غير المناسبِ كلّيًّا تصويرَ الإلكترون وكأنه جسيمٌ يسبح في مدارٍ.

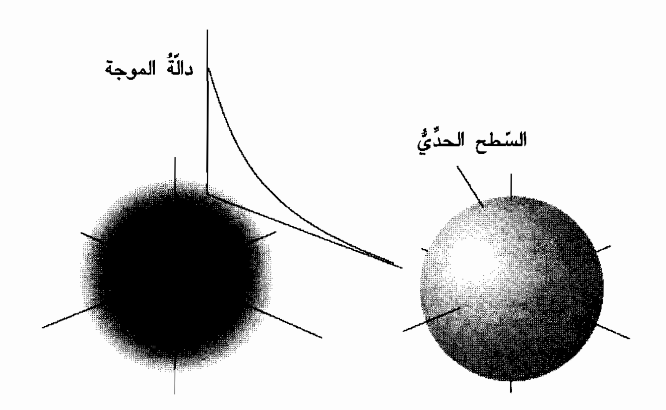
سنرى في الفصل 7 كيف ابتكر إرْوِينْ شرودينغر E. Schrödinger (1887-1961) المعادلةَ التي، إذا تيسّر حلّها، فإنها تفضحُ سلوكَ الإلكتروناتِ. وكلٌّ

ما نحن بحاجةٍ إلى معرفته في هذه المرحلةِ هو بعض نتائجها المتعلقة بالذرات. ما نقبلُهُ الآنَ بأنه بنيةٌ صحيحةٌ بدرجةٍ مقبولةٍ لذرّةِ الهيدروجين - وسنتناولُ ذراتٍ أخرى في وقتٍ لاحقٍ - كان إحدى نتائجِ تطبيق معادلة شرودينغر[5]. وفي سلسلةٍ من أربعة بحوثٍ علميةٍ شهيرةٍ (كان أوّلها من ثلاثة أجزاء) نُشِرَتْ عام 1926، أُطْلِقَتْ فيها التسميةُ «ثورانٌ جنسيٌّ متأخّرٌ»، وكُتِبَتْ في عطلةٍ قضاها عند عشيقته، حلّ شرودينغر معادلتَه المتعلقةَ بالإلكترون في ذرّة الهيدروجين، وذلك من مقدماتٍ منطقيةٍ مغايرة تماماً، استعملَ فيها لطاقةِ الإلكترونِ نفس التعبيرَ الذي كان بور قد وجده قبل سنواتٍ.

ولفهم نتائج حسابات شرودينغر، علينا معرفة أن حلولَ معادلته تتنبّأُ باحتمال وجود الإلكترون في كل نقطة من الفضاء، لا، كما تنصُّ الفيزياءُ التقليديّةُ، على أنّ الموقع الدقيق للإلكترونِ يمكن تحديدُهُ في كل لحظةٍ. تسمّى الحلولُ المداريَّاتِ الذريَّةَ atomic orbitals، وقد قُصِدَ من هذا الاسمِ نقلُ الإشارةِ الضمنيّةِ إلى إلكترونٍ كوكبيٍّ يدور في مداره، لكنْ بدون الصّرامةِ التي يفترضها المفهومُ الكلاسيكيُّ غير القابل للتطبيق.

يبيّن الشكل 5-5 هيئة المداريِّ الذريِّ ذي الطاقة الدنيا في ذرة هيدروجينٍ. وهو يوضح احتمال العثور على إلكترونٍ في منطقةٍ، فكلما زاد هذا الاحتمال زادتْ كثافةُ التظليل في الشكل. وكما ترى، لمّا كانت الغيمةُ تبلغ كثافتها القصوى في الجوار الملاصق للنواة، فمن الممكن الظنُّ أنّ الإلكترون قريبٌ جداً من النواة، مثل دبُّورٍ يحومُ حول طبقٍ وُضِعَ فيه قطعةٌ من الحلوى، وأنّ الموقعَ المقابَل للاحتمالِ الأكبر هو النواة نفسها. وإذا تخيّلتَ كرةً صغيرةً مجوّفةً وُضِعَتْ في مواقعَ مختلفةٍ في الذرة، عندئذٍ سترى أن الإلكترون سيوجد داخل الكرةِ في معظم الحالات عندما تكون الكرة موضوعةً عند النواة. إن غيمة الاحتمال متناظرةٌ كرويًّا (فليس هناك اتجاهٌ مرجَّحٌ على غيره)، لذا، يمكننا أيضاً تمثيل المداريّ بالسطح الكرويّ الذي يحوي معظم الغيمة. ومع ذلك، يجب ألاّ تفكّرَ في المداريِّ

(5) إنها لَمُصَادَفَةٌ أن تكونَ جَدَّةُ إروين، إميلي باور E. Bauer نصفها إنكليزي، وتنتمي إلى ذلك الفرع من العائلة التي قَدِمَتْ من Leamington Spa.



الشكل 5-5. نرى هنا عدّةَ تمثيلاتٍ للمدار s ذي الطاقة الدنيا في ذرة هيدروجين. ويبين المخطّطُ اليساريُّ احتمالَ العثور على إلكترون في كل نقطة بدلالة كثافة التظليل. ويبيّن المخطّطُ المرافقُ كيف يتناقص الاحتمالُ أسِّيًا مع تزايد المسافة عن النواة. ويوضح المخطط الأيمن «السَّطحَ الحدِّيَّ»، وهو السطح الذي يكون احتمال العثور على الإلكترون ضمنه قرابة 90 بالمئة.

وكأنه يملك حافةً حادّةً: فالشكل يبيّن أنّ احتمالَ العثور على الإلكترونِ في نقطةٍ معينةٍ يتقارب بانتظام من الصفر مع الابتعاد عن النواة، وهو لا يصبح صفراً إلاّ عندما نكون على مسافةٍ غير منتهية من الذرة، ووفق هذا التفسير، فإن لجميع الذرات حجوماً غير منتهية، وهذا مناقضٌ جدًّا للفكرة القائلة إن الذرات صغيرة جدًّا. وعملياً، فإن احتمال العثور على إلكترون بعيداً عن النواة (على مسافة أكبر من واحد في مئة تريليون من المتر) قريبٌ جدًّا من الصفر. والأفضل هو تصوّرُ أن ذرة الهيدروجين تملكُ إلكتروناً محصوراً في منطقة من الفضاء قريبةٍ جداً من النواة (منطقة نصف قطرها نحو 100 جزء في التريليون من المتر، أي 100 بيكومتر). يسمى هذا المداريّ الكروي ذو الطاقة الدنيا المداريّ، s-orbital. ومن اللطيف التفكير، وهذا في كل حال يساعد على تقوية الذاكرة، بأن الحرف s يعني كلمة كروي spherical؛ لكن الحقيقة هو أنه اعتُمِدَ لأسبابٍ تقنية تتعلّق بحدّةِ الخطوط في طيف الهيدروجين الذريّ.

إحدى السمات، التي ستتّضح عندما نعرف المزيدَ عن النظرية الكومية، والتي لابد لنا من معرفتها في هذه المرحلة، هي أنّ كون المداريّ في الشكل

السابق متناظراً كرويًّا يقتضي أن يكون للإلكترون الذي يَصِفُهُ اندفاعٌ زاويٌّ angular momentum يساوي الصفر حول النواة. لقد ورد الاندفاع الزاويّ في الفصل 3، حيث رأينا أنه مثل الاندفاعِ الخطِّيِّ linear momentum، لكنه يُطَبَّقُ على الحركةِ في دائرةٍ لا على خطٍّ مستقيمٍ. وكلُّ ما نريد معرفتَهُ في هذه المرحلة هو أن تَمَوُّجَ مداريٍّ ذرّيٍّ، مهما كانت سرعة تغير كثافة التظليل عندما نتحرك حول النواة، يخبرنا عن مقدار الاندفاع الزاويّ. وفي حال مداريٍّ s، يكون للتظليل كثافةٌ ثابتةٌ على أيّ مسارٍ دائريٍّ تقع النواة في مركزه، لذا فإننا نستخلص أن للإلكترونِ اندفاعاً زاويًّا صفريًّا حول النواة. قد تبدو هذه الملاحظةُ التقنيةُ الدقيقةُ وكأنها غيرَ مهمّةٍ، لكننا سنرى قريباً أنها تكمن في أساس عظمة العالَمِ وروعته.

عندما حلّ شرودينغر معادلتَه الخاصّةَ بذرة الهيدروجين، اكتشف وجودَ مداريّاتٍ ذريةٍ كثيرة أخرى، كلٌّ منها يوافق طاقةً أعلى من طاقة الحالة الأساسية ground state. وشَبَهُ ذلك هو اهتزاز كرةٍ، حيث تكون النغماتُ التوافقيّةُ لِتَرَدُّدِهَا الأساسيِّ مقابلةً لحالاتِ الطاقاتِ العاليةِ، ومن الممكن رَفْعُ إلكترونٍ إلى هذه المداريّات إذا كان مزوَّداً بطاقةٍ كافيةٍ، كالطاقة الناتجة عن وميضِ برقٍ شحنةٍ كهربائيةٍ، أو امتصاصِ طاقةٍ من نبضةٍ للفوتونات نسميها وميضَ ضوءٍ.

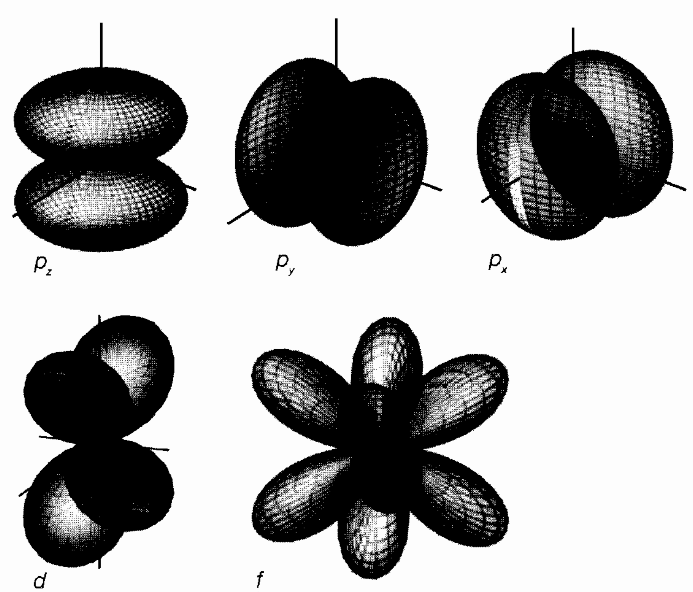
ثمة عدة سماتٍ لمداريّات الطاقة العالية تلك، لا بد لنا من تعرُّفها. أولاً، توجد سلسلةٌ كاملة من المداريّات s، جميعها كرويّةٌ، لكنها تختلف في أبعادها عن النواة: وهي تشكّل سلسلةً من الطبقاتِ الكرويّةِ المتّحدةِ المركزِ، مثل الدُّميةِ الرّوسيّة (التي يسميها الروس «ماتيوشكا»)، حيث تشغلُ النواةُ المركزَ. ولا يوجد لإلكترونٍ في أيٍّ من هذه المداريّات s اندفاعٌ زاويٌّ، لذا يمكن أن يُعثَرَ عليه في النواةِ نفسِها. ومرّةً أخرى، علينا ألاّ نُدْفَعَ إلى الظَّنِّ بأن هذا تفصيلٌ أكاديمي متحذلِقٌ: فالمدن والصناعات الضخمة مبنيّةٌ على تفصيلاتٍ من هذا النوع.

هناك، أيضاً، حلولٌ ليس لها تناظر كروي، حيث تكون غيومُ الاحتمالِ الإلكترونيِّ متمركزةً في بقاعٍ في مناطقَ مختلفةٍ حول النّواة بدلاً من أن تكون

موزّعةً بانتظامٍ حولها. ولابد لنا من معرفة ثلاثة أنماطٍ من المداريّات المبيّنةِ في الشكل 5-6. تسمّى المداريّاتُ التي يتجمع فيها الاحتمال في بقعتيْن مدارِيّاتٍ p، وتلك التي يكونُ تجمُّعُ الاحتمال فيها في أربع بقعٍ مداريّاتٍ d، وفي ستّ بقع مداريّات f[6]. ولما كانت كثافة التظليل، التي تمثل احتمالَ العثورِ على إلكترونٍ في موقعٍ، تتغيّر عندما نتحرك على دائرة حول النواة، فما يحدث عند قياسه خلال تحركنا، هو أن المداريّات p، d، f توافق حالاتِ الاندفاعِ الزاويِّ غيرِ الصفريِّ للإلكترون الذي تصفه، علماً بأن المداريّ d يوافق اندفاعاً زاويًّا أعلى من المداريّ p، وأن المداريّ f، الذي هو أكثر تجعّداً، يظل موافقاً لاندفاعٍ زاويٍّ أعلى. وهذا الاندفاع الزاويّ هو الذي يولِّدُ قوةً نابذة centrifugal تقذف الإلكترون بعيداً عن النّواة. وتبرز هنا ملاحظةٌ تقنيّةٌ دقيقةٌ أخرى سيترتّب عليها قريباً نتائجُ غايةٌ في الأهمّيّة: فبسببِ هذه القوةِ النابذةِ، فإن إلكتروناً موجوداً في أيٍّ من هذه المدارات لن يُعْثَرَ عليه البتة في النواة نفسها.

نحن بحاجةٍ الآن إلى معرفة سمتيْن إضافيّتيْن للحلول التي وجدها شرودينغر لمعادلته. (أنا أعتذر عن عدم إيرادهما الآن، لكنْ سرعان ما سيتضح أن تصرفنا هذا ملائم جدًّا). أولاً، إن نموذج الطاقات مبيَّنٌ في الشكل 5-7. ونرى هنا أنه مع تزايد الطاقة، فإن مزيداً من زمر المداريّات يغدو متاحاً، وذلك مثلما يمكن لكرةٍ الاهتزاز بمزيدٍ من الأساليب وبتردداتٍ أعلى عند ضربها بشدات متزايدة القوة. هذا وعندما تكون الطاقة في حدها الأدنى، لن يتاح سوى مداريٍّ واحد فقط، هو المداريّ s المبيَّن في الشكل 5-5. وفي المستوى التالي، يُتاحُ مداريٌّ s واحدٌ، وثلاثةُ مداريّاتٍ p، وخمسة مداريّاتٍ d، وهكذا. لا وجود لظاهرة سحرية في هذا الترتيب، إذ إنه ليس سوى نموذجِ حلولٍ معادلةِ شرودينغر لذرة الهيدروجين. ويُطلق على زمر مستويات الطاقة طبقاتٍ shells لأن المداريّات التي تنتمي إليها تكوّن توزعاتٍ متحدةَ المركزِ لاحتمالِ وجودِ الإلكترون، وهي تشبه

(6) اشتُقَّتْ هذه التسميات من سماتٍ تقنية ـ نُسيتْ تقريباً منذ وقت طويل ـ تتعلّق بالأطياف، حيث تكون الخطوطُ الحاويةُ على إلكتروناتٍ في هذه المداريّاتِ خطوطاً رئيسية principal، أَوْ لَهَا مظهرٌ منتشرٌ diffuse، أو أنها مصنّفَةٌ بأنها أساسية fundamental، وذلك لأسباب غير معرفة.

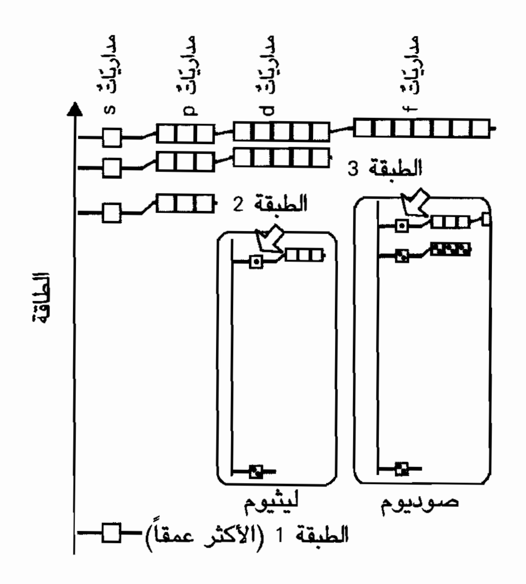


الشكل 5-6. التوزعُ ذو الفَصَّيْنِ لكثافة الإلكترونات (الممثَّلُ بسطحٍ حدِّيٍّ) هو سمةٌ مميِّزةٌ للمداريّ p؛ والتوزع ذو الفصوصِ الأربعةِ مُمَيِّزٌ للمداريّ d؛ والتوزع ذو الفصوص الستة سمة مميِّزة للمداريّ f. وبسبب كون تجعّد المداريّات يتزايد تدريجيًّا (أي أنها توافق موجاتٍ تقصرُ أطوالُها وملفوفة حول كرة)، فإنها توافق اندفاعاً زاويًّا متزايداً للإلكترون. هذا ولا يوجد في أيٍّ من هذه المداريّات احتمالُ العثور على إلكترونٍ موجودٍ في النواة ذاتها: إذ إنه يبتعد بسرعةٍ تدريجيًّا عن النواة مع تزايد الاندفاع الزاويّ.

طبقات البصلة. آخِرُ ملاحظةٍ مهمةٍ هي أنّ لجميع مداريّات طبقةٍ معطاةٍ نفسَ الطاقةِ بالضبطِ. هذه سمةٌ غريبة جدًّا، ويمكن إرجاعها إلى نفس السِّمةِ «الجميلة» للتفاعل الكهربائيّ بين الإلكترون والنّواة نتيجةَ حسابات بور التي تُعَدُّ خاطئةً مفاهيميًّا، وصحيحةً كمِّيًّا.

●

سأقودكم الآن من ذرة الهيدروجين عِبْرَ سلسلةِ الذرات الموافقةِ للعناصر الأخرى. نحن نعرف الترتيبَ الذي يجب سلوكُهُ في دراسة هذه العناصر، لأننا نعرف أعدادها الذرية، ومن ثَمَّ عددَ الإلكتروناتِ التي يجب إدخالُهَا في كل حالة. فمثلاً،



الشكل 5-7. يبيّن هذا الشكلُ مستوياتِ طاقةِ ذراتٍ نموذجيّةٍ. ففي حال الهيدروجين، ذي الإلكترون الوحيد، فإن لجميع مداريّات طبقةٍ معطاةٍ نفسَ الطاقةِ تماماً. وفي حال ذرات العناصر المختلفة عن الهيدروجين (الممثلة في الشكل)، فكلّ قشرةٍ تحتوي مداريّاتٍ تتزايد طاقاتها تدرُّجيًّا. وفي كل الأحوال، فإن المداريّاتِ p تصبح متاحةً أول مرّةٍ في الطبقة الثانية، والمداريّاتِ d تصبحُ متاحةً في الطبقة الثالثة، والمداريّاتِ f تصبح متاحةً في الطّبقة الرابعة. هذا ويوجد طبقاتٌ أعلى في الطاقة من تلك التي بيّنّاها. ويمثل كلُّ صندوقٍ مداريًّا يمكن أن يُشْغَلَ بإلكترونيْن على الأكثر. ويبيّن الشكلان الداخليان شَبَهَيْن للبنيتيْن الإلكترونيتيْن لليثيوم (إلكترونٌ واحدٌ خارجَ القلب) والصوديوم (إلكترونٌ واحدٌ خارج القلب).

إذا كان العددُ الذريُّ للعنصر 15 (وهو العدد الذريّ للفسفور)، فعندئذٍ تحوي نواتُه خمسَ عشرةَ شحنةً إيجابيةً، وبغية تحقيق التعادل الكهربائيّ، يجب أن تحوي كلُّ ذرةٍ خمسة عشر إلكتروناً. الفكرةُ الأساسيّةُ هي أنه سيجري وصفُ إلكتروناتِ هذه الذرات - بعد القيام بتعديلاتٍ طفيفة لابد منها بعد قليل - بواسطة المداريّات والطاقات التي تشبه تلك المداريّات والطاقات التي وجدها شرودينغر للهيدروجين. لكننا سنجد، في سياق بناء الذرات هذا، بعضَ الأشياء الغريبة جدًّا.

العنصر الذي عدده الذريّ 2 هو الهليوم؛ وله نواةٌ مضاعَفَةُ الشحنةِ وإلكترونان[7]. إن ترتيب الطاقة الدنيا هي لكلا الإلكترونيْن اللذين يوجدان في نفس المداريّ s، والحالةِ الأساسيةِ للهيدروجين. ونقول إن الإلكترونيْن يشغلان occupyنفسَ المداريّ s. ولما كانت الشحنةُ النوويةُ أعلى ممّا هي في الهيدروجين، فإن الإلكترونيْن سيُسحبان ليصبحا أقرب إلى النواة؛ لكنْ لمّا كان الإلكترونان يدفع كلٌّ منهما الآخر (الشحنتان اللتان لهما إشارة واحدة تتنافران)، فلابد من وجود بعض المقاومة لاقترابهما من النواة. والنتيجةُ هي أنّ ذرّةَ الهليوم ستكونُ أكثرَ تراصًّا من ذرّة الهيدروجين، لكنها ليست أصغر منها بكثير.

العنصر التالي، الذي عددهُ الذريُّ 3، هو الليثيوم. لنواة الليثيوم شحنةٌ مضاعفة ثلاث مرات، وهي محاطة بثلاثة إلكترونات. سنتطرّق الآن إلى الشيء المذهل. هذه الإلكترونات الثلاثة، لا تستطيع ـ ببساطة، لا تستطيع ـ أن تشغَلَ جميعُهَا المداريَّ s ذا الطاقة الدنيا. إن السّمة التي كانت غائبةً كليًّا عن مناقشتنا لهذا الموضوع حتى الآن، والتي لابد لنا من تقديمها الآن، هي أنه يوجد للإلكترون ثلاثُ سماتٍ مميِّزةٍ دائمةٍ أصيلةٍ intrinsic هي: كتلتُهُ، وشحنتُهُ، وتَدْوِيمُهُ spin. وكما أنّ كثيراً من النَّوى تُدَوِّمُ ـ وهذا رأيناه سابقاً ـ فكل إلكترون في الكون يتَّسم بهذه الخاصيّة أيضاً. ولتحقيق أغراضنا، يمكنُنا تصوُّرُ التدويمِ بأنه يماثل الحركةَ التدويميَّةَ spinning motion التقليديةَ، كتدويم كوكبٍ حول محوره. بيْد أننا يجب أن نَعِيَ أن التّدويمَ في هذا السياق هو خاصيّةٌ ميكانيكيّةٌ كموميَّةٌ صرفةٌ، ولا يجوز التفكير فيه تقليديًّا. فمثلاً، يتعيّن على الإلكترون أنْ يدورَ مرتيْن ليعودَ إلى حالته الابتدائية! وثمة خاصيّةٌ كموميّة ثانية للتدويم ـ لها علاقةٌ أوثقَ بعرْضنا الحاليِّ ـ هي أن للإلكترون (إذا أردنا استعمالَ لغةٍ تقليديةٍ ثانيةً) معدّلَ تدويمٍ مثبتاً، لكنه قد يدورُ باتجاه دوران عقارب الساعة

(7) تتكوّن نواة الهليوم من بروتونيْن ونيترونيْن، وهذا يعطيه وزناً ذريًّا قدره 4. وثمة نسبة صغيرة من الهليوم لها نيوترونٌ واحدٌ فقط، ومن ثم فإن وزنَها الذريَّ 3. إن الذراتِ التي لها نفسُ الوزنِ الذرّيّ، لكنّ لها أعداداً مختلفةً من النيوترونات، تُسمى نظائر isotopes للعنصر.

أو بعكس ذلك الاتجاه بنفس المعدَّلِ. ولا يُسْمَحُ بمعدلاتٍ وسطى للدوران ولا لجهته[8].

الخاصيّةُ الكموميّةُ الثالثةُ للتدويمِ - وليس لها تفسير تقليدي - هي مبدأ الاستبعاد (الانتفاء) exclusion principle، الذي اقترحه عام 1924 الفيزيائيُّ النمساويُّ ولفغانغ پَاوْلِي (1900-1958) W. Pauli، والذي ينصّ على ما يلي:

لا يمكن لأكثر من إلكترونيْن أن يشغلا مداريًّا واحداً، وإذا وُجِدَ إلكترونان في المداريِّ نفسِهِ، فعندئذٍ لا بدّ من مزاوجة تدويميْهِمَا.

ونعني «بالمزاوجة» أنه إذا كان إلكترونٌ يدوِّمُ باتجاهِ دورانِ عقاربِ الساعةِ، فلابدّ أن يدوِّمَ الآخر بعكس هذا الاتجاه. هذا المبدأ هو المفتاحُ لفهم الكيمياء. إنه، أيضاً، مفتاحُ فهمِ سبب كونِ الأجسامِ صلبةً مع أنّها فراغ كاملٌ تقريباً، فإلكتروناتُ ذرّةٍ لا يمكن أن توجَدَ في منطقةِ إلكتروناتِ ذرّة أخرى. وهكذا فعلى الرغم من كون الإلكترونات تنتشر متباعدةً في منطقةٍ نعتبرها «الذّرّة»، فلا تستطيع ذرةٌ أخرى دخولَ تلك المنطقة. لذا، فإن حجمنا، وإمكانَ تمييزِنَا من أيِّ جسمٍ آخرَ يحيط بنا، نتيجتان أساسيتان للتدويم الإلكترونيّ، فإذا أوقِفَ التدويمُ الإلكترونيُّ، انهارت كلُّ المادّةِ - جميعُ سكان العالم، وكلُّ الجبال والمحيطات والغابات، وكلُّ ما هو موجود - وتحوّلت إلى لطخةٍ منتظمةٍ بالغةِ الصّغر، مكوّنةٍ من مادةٍ شمعيّةٍ خاملةٍ. التّدويم هو مصدر شخصيتنا الفردية.

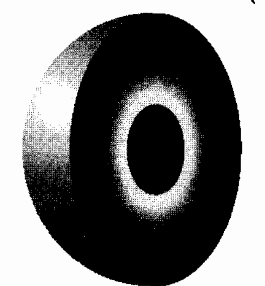
يمكننا الآن إتمامُ قصّةِ الليثيوم. سنتخيّل أننا نضيف الإلكتروناتِ الثلاثةَ بالتتابع، ونؤْويها في المدارياتِ التي لها أدنى طاقة كليّة، مدخلين في الاعتبار مبدأ الاستبعاد. إن أوّل إلكترونيْن يشغلان المداري s الأول. وهذا المداريّ يحتوي الآن على إلكترونيْن، ومن ثم فهو مليء. لذا فإن الإلكترون الثالث مجبَرٌ

(8) إذا تحركتْ كلُّها بنفس الاتجاه، فإن الاندفاع الزاويّ الكلّيّ للإلكترونات في جسمك سيكون مساوياً تقريباً للاندفاع الزاوي الكلّيّ لطابةِ كرةِ الطاولةِ التي أتمّت دورةً واحدةً في الدقيقة. وفي الحقيقة، فإن نصف الإلكترونات تدورُ باتجاه دوران عقارب الساعة، ونصفُها بالاتجاه المعاكس لدوران عقارب الساعة، لذا ليس لك اندفاعٌ زاويٌّ صافٍ أصيلٌ.

على شَغْلِ واحدٍ من مَدَارِيَّيْ s أو p الطبقةَ التاليةَ، لكن أيٌّ من هذين المداريّيْن يشغَلُ فعلاً، علماً بأن لجميعِ المداريّاتِ الأربعةِ الطاقةَ نفسَهَا؟

ليس صحيحاً أنّ لها نفس الطاقة. وقد أوردنا ملاحظةً تتعلّق بالهيدروجين، واقتفينا آثاره وصولاً إلى سمةٍ «جميلةٍ» مبهمةٍ للتفاعل الكهربائي المتبادل بين النواة والإلكترون. وحينما يوجد أكثر من إلكترونٍ واحدٍ في ذرّةٍ، يُفقد هذا «الجمال» (الذي نقصد به نوعاً خاصًّا جدًّا من التناظر)، ويتوقف امتلاك المداريَّيْن s وَp نفس الطاقة. وقد تبيّن أنّ مداريّاتِ p لطبقةٍ معطاةٍ تملك طاقةً أعلى قليلاً من المداريات s للقشرة نفسها. ويمكن أن يُعزى هذا الفرق إلى حقيقة أنّ من الممكن العثور على إلكترونٍ في مداريٍّ s في النواة، في حين لا يمكن العثور هناك على إلكترونٍ في مداريٍّ p. واختصاراً، يمكن لإلكترونٍ في المداريّ s الثاني أن يخترق المنطقةَ المشغولةَ بالكترونيْن في المداريِّ s الأول، وأن يمارس القوة الجاذبة الكاملة لنواة الهليوم التي لها شحنة مضاعفة ثلاث مرات. وبسبب التأثير النابذ لاندفاعها الزاويّ، فلا يمكن للمداريِّ p أن يقوم بالاختراق قريباً من النواة، ومن ثم فهو لا يمارس كاملَ قوته الجاذبة، وتكون النتيجةُ أنه يقع على طبقةٍ ذاتِ طاقةٍ أعلى (كما هو مبين في الشكل 5-7).

وإذا أبقينا في ذاكرتنا ذلك الفرقَ في الطاقة، فيمكننا الآن استخلاص أن ذرةَ الهليوم مكوَّنةٌ من إلكترونيْن في المداريّ s للطبقةِ الأولى، محاطيْن بالكترون يشغل المداريَّ s التالي ذا الطاقة الأعلى. ويمكننا تصور الإلكترونات بأنها تشكل طبقتيْن فيزيائيتيْن متّحدَتَي المركزِ، إحداهما قريبة من النواة وتشكل قلباً كروياً، والأخرى محيطةٌ بها مثل قشرة البندق (الشكل 5-8).



الشكل 5-8. تمثيل لبنية ذرّة الليثيوم. يوجد إلكترونان في قلبٍ متراصٍّ، وإلكترونٌ آخر في غلاف خارجي يحيط بالقلب.

العنصر التالي (الذي عدده الذرّيّ 4) هو البريليوم beryllium، المحتوي على أربعةِ إلكتروناتٍ حول النّواة. لذا فإن عدد إلكتروناته أكبر من عددها في الليثيوم بواحد، ويمكن لهذا الإلكترون أن ينضمّ إلى الإلكترون الخارجي لليثيوم في المداريّ s الثاني. يأتي بعد ذلك العنصر الخامس، البورون boron، الذي عدده الذرّيّ 5 ويحوي خمسة إلكترونات. المداريُّ s الثاني ملآن، لذا لابد للإلكترون الخامس أن يدخل في واحدٍ من المداريّات p الثلاثة، ويسري هذا الكلام نفسُهُ على العناصرِ الخمسةِ التاليةِ، لأنه يوجد هناك ثلاثة مداريّاتٍ p، وبمقدور هذه المداريّات إيواء عدد من الإلكترونات يصل إلى ستة. لذا فللكربون (ستة إلكترونات) قلب داخلي شبيه بقلب الهليوم فيه إلكترونان، ويوجد إلكترونان آخران في مداريٍّ s محيط به، ثم إلكترونان آخران في المداريّات p. ومن قبيل المصادفة، يجد هذان الإلكترونان أنه من المستحسَن طَاقَويًّا energetically أن يشغلا مداريَّيْنِ p مختلفين من القشرة، لأنهما يكُونان آنذاك بعيديْن أحدهما عن الآخر، ومن ثَمَّ فإن دَفْعَ كلٍّ منهما الآخَرَ يكونُ أضعفَ. وللنتروجين (سبعة إلكترونات) إلكترون آخر في المداريّ p، وكذلك الأكسجين (ثمانية إلكترونات)، والفلور fluorine (تسعة إلكترونات)، والنِّيُون neon (عشرة إلكترونات).

حتى الآن، نرى أن جميع المداريّات p الستة للقشرة مليئة، ويجب على الإلكترون التالي (العدد الذري للصوديوم 11) أن يشغل المداريَّ الذريَّ الأعلى التالي، وهو مداريٌّ s آخر. إن بنية ذرة الصوديوم شبيهة ببنية ذرّة الليثيوم، ولها قلبٌ داخليٌّ كاملٌ، وإلكترونٌ وحيدٌ من مداريٍّ s في غلاف خارجيٍّ يحيط بالقلب.

هذه نقطة استثنائية في رحلتنا، مع أنني قفزْتُ عن موضوعٍ بهدوءٍ دون أن يلاحَظَ ذلك. لقد رأينا أن بنيةَ ذرةِ الهليومِ مكوّنةٌ من غلافٍ جرى إكماله؛ ونحن بحاجةٍ أيضاً إلى معرفة أنّ الهليوم غازٌ غيرُ تفاعليٍّ (خامل) unreactive وأحاديُّ الذّرّة monatomic (أي أن الغاز مؤلّف من ذرةٍ وحيدةٍ ذات حركة حرّة). وبعد ثمانية عناصر أخرى، نصل إلى النّيون، وهو غازٌ آخر خاملٌ وأحاديُّ الذرّة له غلاف مكتمل من الإلكترونات. هذا، وبعد النّيون مباشرةً، ألقينا نظرةً

سريعةً على الليثيوم، وهو معدنٌ تفاعلي جدًّا؛ وتتألف بنيته الذرية من إلكترونٍ وحيدٍ خارج غلافٍ مُكْتَمِلٍ. والآن - بعد الليثيوم بثمانية عناصر - يأتي الصوديوم، وهو معدنٌ آخر تفاعليٌّ جدًّا. إن بنية ذرّة الصوديوم شبيهةٌ تماماً ببنية ذرّةِ الليثيوم، ولها إلكترونٌ وحيد خارجَ الغلافِ المكتمِلِ. لقد سلّطنا الضوءَ على دَوْريَّةِ periodicity العناصرِ، وهذا يثبت أن المادةَ ليست تجمّعاً عشوائيًّا من الأعضاءِ المنفصلِ بعضها عن بعضٍ، لكنها عائلاتٌ families، لأعضائها سماتٌ كيميائيةٌ متشابهةٌ وبنًى إلكترونيةٌ متشابهةٌ.

●

لفهم التأثير الذي أحدثه هذا الاكتشافُ، ولرؤيته في سياقِه الثقافيِّ والتاريخيِّ الخاصِّ، لابدّ لَنَا من العودةِ إلى القرنِ التاسعَ عشرَ، بغية الخروج عن بُنَى الذرّة لرؤية العناصر من الخارج، وذلك بعيون القرن التاسعَ عشرَ، لكونها تُؤْثِرُ التجربةَ والرؤيةَ عن قربٍ.

وبحلول منتصفِ القرنِ التاسعَ عشرَ، صار عددُ العناصرِ المعروفةِ قرابةَ 60. ومع أنّ بعضَها كان معروفاً في الأزمنة قبل التاريخية، لكنّها لم تكن معروفةً بوصفها عناصرَ. فالكربونُ، والحديدُ، والكبريتُ، والنحاسُ، كانت معروفةً للأقدمين، وهذه عناصرُ بالمعنى الحديث، لا بالمعنى التخمينيِّ لليونانيين. العناصر، بكلماتِ روبرت بُويْلْ (1627-1691) R. Boyle، الواردةِ في كتابِهِ بعنوان الكيميائيُّ المتشكِّك (1661) The sceptical chymist، هي أجسامٌ بدائيّةٌ وبسيطةٌ معيّنةٌ، غيرُ مختلطةٍ بأجسامٍ أخرى إطلاقاً، وهي غيرُ مركَّبَةٍ من أجسامٍ أخرى، أو من بعضها بعضاً، وهي مكوِّناتُ كلِّ تلك الأجسامِ المسمّاةِ خلائطَ، والتي يجري تركيبها فوراً من تلك المكوِّنات، والتي يجري تحليلها إليها في النهاية.

وثمة تعريف للعناصر، أقلُّ إسهاباً، لكنّه أفضلُ عملياتيًّا، جَاءَ به أنطوان لافوازييه، ينص على ما يلي:

العناصر هي كلُّ الموادِّ التي لم نتمكّن حتى الآن من تجزئتها بأيّ وسيلةٍ.

إنّ تعريفَ لافوازييه أبقَى السؤالَ التالي مفتوحاً: أَمِنَ الممكنِ أن يُؤدّي بذلُ جهودٍ أَشَقَّ إلى تجزئةِ ما نعتبرها عناصرَ، وإلى استبعادها من جدول العناصر الأوّليّة؟ لقد أعدّ لافوازييه قائمةً تحوي ثلاثةً وثلاثين عنصراً وفق تعريفه السابق. وقد جرى فعلاً استبعادُ ثمانيةٍ منها عندما بُذِلَتْ جهودٌ أقوى لتحليلها، لكنّ اثنيْن منها (الضوء والحرارة) كانا خاطئين كلياً. ويبتعد التعريف الحديث عن هذه الطريقة الكيميائية، إذْ يعرَّف فيه العنصرُ بطريقةٍ مباشرةٍ بالنص التالي:

العنصرُ هو مادّةٌ مكوَّنةٌ من ذرّاتٍ لها نفسُ العددِ الذرّيِّ.

بدأ العصرُ الحديث جدِّيًّا عندما اكتَشف هِينِيكْ بْرَانْدْ H. Brand (عام 1669 تقريباً) من هامبورغ الفسفورَ، الذي ظلّ أوّلَ عنصرٍ جديدٍ طوال قرون. لم يكن إجراؤه محبَّباً إلى جيرانه، ثم إنه لم يشجِّعِ الباحثين المفترَضين على سلوك طريقته. فقد جمعَ خمسين دلواً مملوءاً بالبول البشري، وجعلها تتبخّر وتتعفّن، وذلك بغلي محتواها إلى أن صار راسباً عجينيًّا، ثم خمّر وسخّن الراسب الأسود مع الرّمل، وجمّع البخار في مُعْوَجَّةٍ retort[9]. هذه المادةُ، السحريّةُ ظاهريًّا، توهّجت في الهواء، ومن ثَمَّ اعتُبِرتْ وسيلةً لمكافحة المرض، أو، على الأقل، لجني الربح. وكما هو الحال في الإجراء الذي اتخذه براند، كانت أولُ تقنيّةٍ استُعمِلَتْ لتحليلِ المركّبات إلى العناصِر التي تكوِّنها، هي الحرارةَ التي يضافُ إليها أحياناً موادُّ أخرى، مثل الكربون لاستخراج الحديد من المعدن الخام، وأحياناً تُسْتَعْمَلُ وحدَهَا، وذلك للاكتشاف الخِلاَفِيِّ للأكسجين بفعل الحرارة المطبّقة على أكسيد الزئبق.

كان من الصعب الحصول على حرارةٍ شديدة قبل الثورة الصناعيّة، ومن الأفكار الخلاّقة التي قُدِّمَتْ انتزاعُها من الشّمس باستعمالِ عدساتٍ جبّارةٍ. بيْد أنّ أداةً جديدةً وقعت في أيادي العاملين في تحليل المواد إلى عناصرها تمثّلتْ باختراعِ الخليّةِ الفولطيّةِ voltaic cell وَتَوَفُّرِ التيّارِ الكهربائيِّ. وهكذا فقد استعملَ

(9) يجب الاّ تفوتَنا ملاحظةُ أنّ للبول والرّملِ كليهما لوناً ذهبيًّا، لذا كانت طريقة براند ترمي، أساساً، إلى الحصول على الذهب، انطلاقاً من مبدأ التلوين الذي كان يؤمن به براند والذي جعله يفترض أن الموادّ ذات اللّون الذهبيّ يمكن تحويلُها إلى ذهب حقيقي.

همفري ديڤي (1829-1778) H. Davy الإلكتروداتِ في كل شيءٍ تقريباً كان في متناوله في المعهد البريطاني، ونجح - في أسبوعٍ واحدٍ من شهرِ أكتوبر/تشرين الأول من عام 1807 - في اكتشاف البوتاسيوم بواسطة التحليل الكهربائي للبوتاسِ (نترات البوتاسيوم) المنصهر، ثم الصوديوم بواسطة التحليل الكهربائي للصودا (كربونات الصوديوم) المنصهرة. وقد قال جون ديڤي، شقيقُ همفري، أن همفري «رَقَصَ وغمرتْهُ البهجةُ» نتيجةً لاكتشافه. وكان مجموعُ ما اكتشفه ديڤي ستّةَ عناصر (الصوديوم، البوتاسيوم، الكالسيوم، المغنيزيوم، السترونسيوم، الباريوم). هذا وإنّ موجةَ الاكتشاف، التي سبَّبَها، بالدرجةِ الأولى، تطبيقُ التّحليلِ الكهربائيِّ electrolysis، زادتْ عددَ العناصرِ ليصلَ إلى تسعةٍ وأربعين بحلول عام 1818. وقد اكتشفَ الكيميائيُّ السويديُّ جونز بيرزيليوس J. Berzelius (1848-1779) نفسُهُ ثلاثة عناصر (السِّيريوم cerium، السِّلينيوم selenium، الثُّوريوم thorium، واستبعد رموزَ العناصر التي اعتمدها دالتون، والتي كانت تميلُ قليلاً إلى الكيمياء القديمة alchemy، وكانت غيرَ ملائمةٍ طباعيًّا، وقدّم، عوضاً عنها، رموزاً أبجديَّةً عمليَّةً، هي التي نستعملها في هذه الأيام، مثل Ce للسيريوم، Se للسِّيلينيوم، Th للثوريوم. وقد امتعض دالتون بشدةٍ من هذا التدخّلِ الأجنبيِّ في مجال عمله، وأصيب بسكتتيْن دماغيّتيْن، أُولاهما داهمته خلال مناقشةٍ أجراها مع أحد زملائه تتعلق برموزه.

من الصعب تفحُّص عملِ منشارِ قَطْعِ النماذجِ jigsaw إلاّ بعد أن يكون نَشَرَ عدداً كافياً من القِطَعِ. لقد بدأ أول نموذج من خاصّيّات الموادّ بالظهور في العشرينيات من القرن التاسع عشر عندما صار صندوق القِطَعِ مملوءاً إلى نصفه تقريباً. كان ثمةَ سمتان لهذا المنشار، إحداهما الخاصيّاتُ النوعيّةُ للعناصرِ، والتشابهاتُ والاختلافاتُ الكيميائيةُ بينها، والثانية هي القياسُ الكَميُّ لذرّاتِ العناصرِ، وأوزانِها الذرّيّة. هذا وإنّ يوهان دُوبيرِينَرْ J. Döbereiner (1849-1780) من يِينَا Jena، الذي كان ابنَ حُوذِيٍّ، ولم يَتَلَقَّ العلمَ في المدارس، لكنه كان شديدَ الانتباه وقويَّ الملاحظة - وهذا جعله في وقتٍ لاحقٍ أستاذاً جامعيًّا - لاحظَ شيئاً غريباً إلى حدٍّ ما، أدّى إلى إيجاد انسجامٍ بين هاتين السّمتيْن. فقد لاحظ

أن لثلاثيّاتٍ triads معيّنةٍ من عناصرَ متشابهةٍ كيميائيًّا أوزاناً ذرّيّةً بحيث أنّ الوزن الذريّ لواحدٍ من هذه العناصر قريبٌ من معدّل الوزنين الذريّين للعنصريْن الآخريْن. وعلى سبيل المثال، إن عناصرَ الكلور chlorine والبروم bromine واليود iodine متشابهةٌ كيميائيًّا، وأوزانُها الذريّةُ هي 35، 80، 127 بالترتيب (معدل 35 وَ 127 هو 81). وقد عثر دوبيرينر على ثلاثٍ من هذه الثلاثيّات، ومن هنا نشأت فكرةُ أن العناصر، تُشَكِّلُ، لسببٍ ما، نسيجاً مزركشاً tapestry.

كان البحث عن العناصرِ مازالَ جارياً. وأنا لا أنوي هنا تقديم تاريخٍ مفصّلٍ لهذا البحث، أو نَسْبَ الفضْل اللازمِ لجميع الشخصيات التي أسهمتْ في هذه العمليّة، لأنّ أكثرَ ما يهمّني هي النتائجُ لا المحاولاتُ. لكنْ يجدر بنا دعوةُ اثنين من الذين أسهموا في عملية البحث إلى المسرح. أولهما جون نيولاندس .J Newlands (1837-1898)، وهو سليلُ عائلةٍ إنكليزيةٍ - إيطاليّةٍ، وقد كان، مثل كانيزارو، يتّسم بحماسةٍ قوميّةٍ عاليةٍ جعلتْهُ، وهو مازال في الثالثة والعشرين، يرتحلُ إلى صقلّية ليحاربَ مع غاريبالدي زمرةَ القمصان الحمر Red Shirts. وبعد تحقيق هدفه، عاد أدراجَهُ إلى إنكلترا، واكتَشفَ مكوِّناً جديداً للنموذج، وقد رأى أنه في حين لم يلاحظ دوبيرينر سوى تَبَعْثُرٍ للثلاثيات، فثمّةَ نموذجٌ أكثر منهجيةً، وذلك للعناصر الخفيفةِ على الأقل. وهكذا وجد أنه عندما تُرَتَّبُ العناصرُ الخفيفةُ وفقاً لتزايدِ أوزانِهَا الذريّةِ، فإنّ التشابهاتِ بين الخاصّيّاتِ تتكرّر بعد كل ثمانية عناصر (كانت العناصر الغازيّة، وهي الهليوم، النّيون، الأرغون، مجهولةً في تلك الأيام). وفي استعراضٍ غير حكيمٍ للأحداث الماضية، رَبَطَ هذا التكرارَ بعلاماتِ السُّلَّمِ الموسيقيِّ، وسمّاه «قانونَ الثُّمَانِيَّاتِ» law of octaves. وقد كلّفه هذا التشابهُ الغريبُ والوهميُّ ثمناً غالياً، إذ وُبِّخَ وسُخِرَ منه لأنّه اقترح شيئاً مثيراً للغيظ، وربما كان مصادفةً، ورأى آخرون أنه حاول ترتيبَ العناصر ألفبائيًّا أو باستعمال معيارٍ غريب عجيب.

ومع ذلك، كان على حقٍّ فيما قدّمه. فهذه الخاصّيّاتُ للعناصر المبكّرة تتكرّر فعلاً مثل العلامات في السُّلَّمِ الموسيقيِّ، لكنْ بعيداً عن أيّ سببٍ موسيقيٍّ. فكما سبق ورأينا، فإن بُنَى ذرّاتِ العناصرِ تتكرّر دوريًّا مع اكتمالِ

الطبقاتِ الداخليّةِ، وابتداءِ نموذجِ شَغْلِ المداريَّاتِ من جديدٍ. لكنّ مِثْلَ هذا المستَنَدِ النظريِّ كان بحاجةٍ إلى وقت مستقبليٍّ طويلٍ، إذ إن قدرتَهُ على المساعدة في أوائلِ القرنِ التاسعَ عشرَ كانت ضعيفةً جدًّا، ذلك أن الذرّات كانت آنذاك مازالتْ في مهدها مفاهيميًّا، وكان الإلكترونُ غيرَ معروفٍ أيضاً.

الشخصيّةُ الثانيةُ هي، بالطبع، ديمتري إيڤانوفيتش مِنْدِلْيِيڤْ D.I. Mendeleev (1834-1907)، وهو الأخ الأصغر لأحد عشر، أو أربعة عشر، أو سبعة عشر طفلاً، وفقاً لأحد المصادر. وكان أبوه تاجراً للخيول، وأمُّهُ سيدةً رعتْ بعناية فائقةٍ أصغر أولادها الذي ظهرت عليه أماراتُ النبوغ منذ نعومة أظفاره. وبحلول الوقت الذي بدأ فيه مندِلييڤ تأليف كتابه في الكيمياء العامة، الذي أسماه Osnovy Khimii (مبادئ الكيمياء)، كان عددُ العناصرِ المعروفةِ قد ارتفعَ ليبلغَ واحداً وستين. وكانت مشكلته تتجلّى في طريقة ترتيب الموادّ لتقديمها بأسلوبٍ منطقيٍّ منسجمٍ إلى قرّائهِ. ولا بدّ لنا في هذا هنا رواية حكاية طريفةٍ يبدو أنها بعيدة عن الحقيقة.

الحكاية السعيدة هي أن مندلييڤ كان يبذل جهوداً جبارة طوال أيامٍ، وربما أسابيعَ، بغية التوصل إلى ترتيبٍ منطقيٍّ للعناصر، وعندما استبدّ به التعبُ، غَلَبَ عليه النّعاسُ في 17 شباط/شباط عام 1869[10]، ورأى «في المنامِ جدولاً توزّعت فيه العناصر على النحو المطلوب. وعندما استيقظتُ كتبتُ مباشرةً ما حلمتُ به على قطعةٍ من الورق» (الشكل 5-9). ويروي قسم من هذه الحكاية أنّ حُبَّ مندلييڤ لِلَعِبِ الورقِ (الشَّدَّة) عندما كان يذهب في رحلاتٍ طويلةٍ قاده إلى كتابة أسماء العناصر بترتيبها الصحيح على قطعٍ من الورق المقوّى ليلعبَ بها. وقد ظنَّ كثيرون ممن سمعوا بتلك الحكاية أنها صحيحة. لكن يبدو أنها ليست كذلك، إذ إن ما تبيّن بعد ذلك أنه لم يكن ثمة حُلُمٌ، وأن حكاية كتابةَ العناصر على ورق اللَّعِبِ تبدو خيالاً بعيداً عن الحقيقة.

(10) هذا بالتقويم اليولياني القديم، ويقابلُ 1 آذار/مارس بالتّقويمِ الغريغوريِّ.

405

Bei der Vergleichung der gefundenen Zusammensetzung des Korns mit der des Mehls ergiebt sich, dass verloren gingen:

Asche	Kleber	Stärke	
0,043 Proc.	1,142 Proc.	6,459 Proc.,	zusammen 7,644 Proc.

Davon wurden verstäubt 3,988 Proc. Mehl, also beträgt die Differenz der Analysen etwa 3,7 Proc. Verf. glaubt, dass diese Differenz im Stärkegehalt zu suchen ist, weil dieser sich nicht genau bestimmen lässt. — Die Zusammensetzung einer Mehlprobe, welche noch alle Kleie enthielt, stimmte fast völlig überein mit der des ganzen Korns. Es wurde gefunden:

			Fe_2O_3	CaO	MgO	KO	NaO	PO_5	
Wasser	10,742								
Stickstoff	2,506								
Stärke	64,475								
Asche	1,503,	worin	0,852	4,246	14,721	31,898	0,704	49,720	= 102,141.

Dagegen hatte ein Mehl des ganzen Korns, aus welchem 13 Proc. Kleie abgesondert war, folgende Zusammensetzung:

			Fe_2O_3	CaO	MgO	KO	NaO	PO_5	
Wasser	10,548								
Stickstoff	2,518								
Stärke	65,660								
Asche	1,032,	worin	1,338	6,085	12,425	31,456	1,878	46,761	= 100,943.

(Ann. Ch. Pharm. 149, 343.)

Ueber die Beziehungen der Eigenschaften zu den Atomgewichten der Elemente. Von D. Mendelejeff. — Ordnet man Elemente nach zunehmenden Atomgewichten in verticale Reihen so, dass die Horizontalreihen analoge Elemente enthalten, wieder nach zunehmendem Atomgewicht geordnet, so erhält man folgende Zusammenstellung, aus der sich einige allgemeinere Folgerungen ableiten lassen.

			Ti = 50	Zr = 90	? = 180
			V = 51	Nb = 94	Ta = 182
			Cr = 52	Mo = 96	W = 186
			Mn = 55	Rh = 104,4	Pt = 197,4
			Fe = 56	Ru = 104,4	Ir = 198
			Ni = Co = 59	Pd = 106,6	Os = 199
H = 1			Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200
	Be = 9,4	Mg = 24	Zn = 65,2	Cd = 112	
	B = 11	Al = 27,4	? = 68	Ur = 116	Au = 197?
	C = 12	Si = 28	? = 70	Sn = 118	
	N = 14	P = 31	As = 75	Sb = 122	Bi = 210?
	O = 16	S = 32	Se = 79,4	Te = 128?	
	F = 19	Cl = 35,5	Br = 80	J = 127	
Li = 7	Na = 23	K = 39	Rb = 85,4	Cs = 133	Tl = 204
		Ca = 40	Sr = 87,6	Ba = 137	Pb = 207
		? = 45	Ce = 92		
		?Er = 56	La = 94		
		?Yt = 60	Di = 95		
		?In = 75,6	Th = 118?		

1. Die nach der Grösse des Atomgewichts geordneten Elemente zeigen eine stufenweise Abänderung in den Eigenschaften.

2. Chemisch-analoge Elemente haben entweder übereinstimmende Atomgewichte (Pt, Ir, Os), oder letztere nehmen gleichviel zu (K, Rb, Cs).

3. Das Anordnen nach den Atomgewichten entspricht der *Werthigkeit* der Elemente und bis zu einem gewissen Grade der Verschiedenheit im chemischen Verhalten, z. B. Li, Be, B, C, N, O, F.

4. Die in der Natur verbreitetsten Elemente haben *kleine* Atomgewichte

الشكل 5-9. صورة طبق الأصل للصفحة الواردة في المجلة Zeitschrift für chemie (مجلة الكيمياء) المطبوعة عام 1869، التي أعلن فيها مندلييف صيغةً مبكِّرةً للجدول الدَّوْريّ.

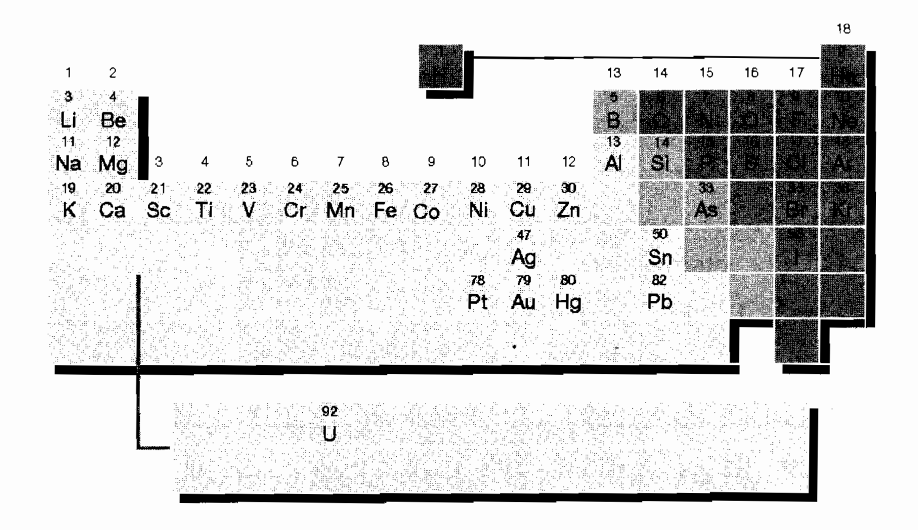
وأياً كانت الحقيقة، فمن المؤكد أن مندلييف قدّم إلى العالَم جدولاً، هو الجدول الدوريّ periodic table، الذي جمع العناصر معاً بأسلوبٍ نَسَبِيٍّ genealogical معيّن. وقد استعمل الأوزانَ النسبيّةَ لترتيبِ العناصر، ووجد تشابهاتٍ تتكرّرُ بأدوارٍ كلَّ ثمانيةِ عناصر وثانية عشر عنصراً. وكان لابدّ له من أن ينشر العناصرَ في الجدول هنا وهناك (وهذا يُنْسَبُ عادةً إلى البصيرة الكيميائية، لكنه يبدو أكثر شبهاً بالطريقة التي سلكها پْرُوكْرَسْتِيز Procrustes، وهو لصٌّ إغريقيٌّ خرافي كان يَمُدُّ أرجل ضحاياه أو يقطّعها كي يجعل طولَهم منسجماً مع فراشه). وهكذا فإن ترتيبَ العناصر المبنيَّ على الوزن الذريّ لم يكن ملائماً لنموذجِ التشابه الكيميائيّ في كل مكان، لذا تَجَاهَلَ مندلييف الترتيبَ واختار ترتيبَهُ. ونحن نعرف الآن أن ذلك الإجراءَ صحيحٌ لأن الوزنَ الذرِّيَّ

ليس أفضلَ معيارٍ لترتيب العناصر: فأفضلُ طريقةٍ لترتيب العناصر هي وفق العدد الذرّيّ، ولأسبابٍ أصبحت اليوم مفهومةً تماماً، فإنّ الوزنَ الذَّرِّيَّ لا يتبع تماماً ترتيبَ العددِ الذرّيّ أينما كان. كان ثمة، أيضاً، فجواتٌ مذهلةٌ. بيد أن الذهولَ في هذه الحالة كان إيجابيًّا، لأنّ مندلييف كان واثقاً بأنه بصياغته للجدول استطاع، بتطبيق الاستقراء الداخلي interpolation على خاصّيّات العناصر المجاورة المعروفة، أن يتنبأ بخاصيّاتِ العناصر التي لم تُكتشَفْ بعد. لذا تنبّأ بوجودِ وبخاصيّاتِ العناصرِ التي أسماها أشباه الألومنيوم eka-aluminium وأشباه السليكون eka-silicon، وقد اكتُشفت هذه العناصر في وقت لاحق من قِبَلِ الفرنسيين، الّذين أسمَوْهَا غاليوم gallium، ومن قِبَلِ الألمان، الّذين أسمَوْهَا جرمانيوم germanium، بالترتيب[11]. لقد ارتكب أخطاءً أيضاً إذ تنبأ بعناصرَ لم يكن لها وجودٌ في الواقع، ولكنْ بوجود الإرادة الطيّبة للأجيال التي أتتْ بعدَ مندلييف، والتي كانت مُعْتَرِفَةً بفضله، فقد جرى تناسي معظم تلك الأخطاء.

نحن نَعْرِفُ الآن قرابةَ 110 عناصرَ، ولا وجود لفجواتٍ في معظم الجدول. ونحن نعرف، أيضاً، أنّ الأعداد الذّرّيةَ تتغيّر بسلاسةٍ من 1 إلى 110، دون إغفال شيءٍ. وثمة تقارير متفرّقة تتحدّث عن اكتشاف عناصرَ بحيث يصل عددها إلى 114، لكن هذه التقارير تنتشر ثم يتوقف الحديث عنها، علماً بأن العنصر 113 لم يُعْثَرْ عليه بَعْدُ. هذه هي النهاية «الأكاديمية» للجدول الدوريّ. أمّا حقيقةُ كونه توقّف عندما وصل إليه أم لا، فموضوعٌ لا يحظى إلاّ بالقليل من الأهمية العملية.

الشكلُ الحديثُ للجدول الدوريّ مبيَّنٌ في الشكل 5-10. وكما ترى، فقد جرى تدوير ترتيب ماندلييف بزاويةٍ قدرها 90 درجة، لكنّ السِّماتِ العامَّةَ لمخطَّطه تُرَى بسهولةٍ. تُسمّى الأعمدةُ الرأسيةُ (العمودية) زمراً groups،

(11) قبل تدخل اللجان الدّولية التي أصرّتْ على سلوك الرصانة لدى اعتماد أسماء العناصر، فقد أُطلقتْ بعضُ الدعابات، التي كانت سيئة. وهكذا، فمع أن غاليوم هو الاسم الذي ربما اختاره مكتشفه الفرنسيُّ François Lecoq de Boisbaudran بغية نفخ صدور مواطنيه بالزهوّ والكبرياء، فإن gallus gallus هو الاسم اللاتيني للديك، cock، ومن ثم فإن صدره كان منفوخاً بطبيعته.



الشكل 10-5. الشكل الجديد للجدول الدّوريّ؛ لا أُوردْ هنا سوى بضعة عناصر، وهي تلك التي أعتقدُ بأنها معروفةٌ جيِّداً، أو أنها تتصدّر زمرَهَا (K هو البوتاسيوم، Na الصوديوم، Pb الرصاص، Fe الحديد، Sn القصدير: ومن الملاحظ أن الكيميائيين يندفعون إلى استعمال الأحرف اللاتينية أحياناً). تسمى الأعمدةُ الرأسيّةُ المرقّمةُ زمراً groups، والأسطرُ الأفقيةُ أدواراً periods. وقد وُضِعَ الهيدروجين في رأس الجدول (إما مزاجيًّا، أو، برأيي الشخصيّ، بطريقةٍ واعيةٍ)، ولا يُنْسَبُ إلى أيّ زمرةٍ. ويشير اللونُ الرماديُّ الشاحبُ إلى المعادنِ، والرماديُّ الغامقُ إلى اللاّمعادن. والرماديُّ المتوسّطُ إلى أشباهِ المعادنِ metalloids، وهي عناصرُ لها خاصّيّاتٌ تتأرجح بين خاصّيّاتِ المعادن واللاّمعادنِ. هذا وإنّ العناصرَ الموجودةَ بين السطريْن أسْفَل الجدولِ يجب وضعُها في الموقعِ المبيَّن، لكنْ هذا يجعل الجدولَ غليظاً وصعباً جدًّا. الجدولُ ينمو تدريجيًّا نتيجةَ صنْعِ عناصرَ جديدةٍ.

والأسطُرُ الأفقيةُ أدواراً periods. وماتزال ثُمانيّاتُ نيولاند مسموعةً في الدّورين 2 وَ 3، ثم إن ثلاثيات دوبيرينر ماتزال مبعثرةً هنا وهناك. وتتضمّن الزّمرُ الرأسيةُ العناصرَ التي يوجد بينها تشابهاتٌ كبيرةٌ، مثل أنماط المركَّبات التي تكوّنها، وهي تُظهِرُ تغيراتٍ منهجيةً من الذروة إلى القاع. وتُظهِر العناصرُ في الأدوارِ الأفقيةِ تغيراً سَلِساً لدى السَّيْر من اليسارِ إلى اليمين. فمثلاً، تَظهرُ المعادنُ في أيسر الدّور، واللاّمعادنُ non-metals في أيمنه. إن العناصرَ الموجودةَ في القسم المركزيِّ الرفيعِ الطويلِ، مثل الحديد (Fe) والبلاتين (Pt)، هي معادنُ انتقالية

transition metals، لأنها تمثل انتقالاً بين المعادن التفاعلية جد، مثل الصوديوم (Na) والكالسيوم (Ca) في يسار الجدول، وبين المعادن الأقل تفاعلية بكثيرٍ، مثل القصدير (Sn) والرصاصِ (Pb) في يمين الجدول. هذا وإن القسمَ الرقيقَ جدًّا، الذي يحوي 28 عنصراً، والموضوعَ تحت الجدول، يتضمّن معادنَ الانتقالِ الداخليّ. وفي الحقيقة، يجب إدخالُ هذا الشريطِ الضيّقِ في الجدولِ الأساسيّ، لكنّ هذا يجعل الجدولَ طويلاً جدًّا، ومن ثَمَّ تغدو طباعتُه صعبةَ. ومعادنُ الانتقالِ الداخليِّ متشابهةٌ جدًّا جميعُهَا في خاصياتِها الكيميائيّةِ، وكانت بين أحدث العناصر التي يمكن فصلُها ومعرفتُها. وفي الحقيقة، فإن أدنى سطرٍ ـ الذي يعقُبُ اليورانيوم (U) ـ مكوّنٌ من تلك العناصر فقط التي عُمِلَتْ اصطناعيًّا.

مازال الجدول الدوريّ ينمو. ويَستعمل العلماءُ مسرِّعاتِ الجسيماتِ في قذف نوى عنصرٍ لرَشْقِ نَوَى عناصرَ أخرى، آملين في أن النّواتيْن ستندمجان وتكوّنان نواةَ عنصرٍ غيرِ معروفٍ بعد، وقد طُبِّقَتْ هذه الطريقةُ في صنع العنصر 112 (الذي لم يُعْطَ اسماً بعد). ومع ذلك، فالنّوى غيرُ مستقرَّةٍ إطلاقاً، والنّوى القليلةُ التي صُنِعَت تتّسم بوجودٍ سريع الزوال.

آمل أن تكونَ قد بدأْتَ بمعرفة السببِ الذي جعل الكيميائيّين يعتبرون الجدولَ الدوريَّ أهمَّ مفهومٍ لديهم. فهو يلخّصُ خاصِّيَّاتِ العناصرِ ـ التغيُّرَ في خاصِّيَّاتِها الفيزيائية، مثل كثافتِها، والتغيُّرَ في خاصِّيَّاتِ الذراتِ، مثل أقطارِها، والتغيُّرِ في خاصّيّاتها الكيميائية، مثل عددِ ونمطِ الرّوابطِ التي تكوّنها مع الذرات الأخرى (الشكل 5-11). وبنظرةٍ سريعةٍ، يمكننا أن نرى ما إذا كان عنصرٌ يملك الخاصّيّاتِ المميِّزةَ لمعدنٍ (الحديد)، أو لا معدنٍ (الكبريت)، أو لشيءٍ ما بينهما (السليكون). ويمكننا توقّعُ الخاصّيّاتِ الكيميائيةِ لعنصرٍ بملاحظة خاصِّيَّاتِ جيرانِهِ، والتفكيرُ في النّزَعاتِ المتوقَّعةِ من الزمر أو من الأدوار. وخلاصة القول إنّ الجدولَ الدوريَّ مختصرٌ مفيدٌ ومُحْكَمٌ استثنائيًّا لخاصّيّاتِ العناصرِ، وله قوةٌ تنبّؤية كبيرة. وقد قطعنا مسافةً طويلةً منذ أن كان الجدولُ الدوريُّ الأصليُّ، الذي يحوي الترابَ والنّارَ والهواءَ والماءَ. مرتباً في مربَّعٍ بسيطٍ!

الشكل 5-11. يوضح هذا المخطط دوريّةَ خاصّيّات العناصر، إذْ يبيّن أقطار الذرات. أصغرُ الذراتِ قريبةٌ من الزاويةِ العليا اليُمنى. وأكبرُ الذراتِ قريبةٌ من الزاوية الدّنيا اليسرى. تفصيلات توزيع الخاصيات مفهومة جيّداً. ويمثل حجمُ ذرةٍ معياراً هامًّا لتحديد الخاصياتِ الفيزيائيةِ لعنصرٍ (مثل الكثافة)، وخاصّيّاته الكيميائية (مثل عددِ الروابطِ التي يُمكن لذرةٍ إقامتُهَا).

●

لقد جمّع مندلييف جدوله تجريبيًّا. لم يكن يَعْرِفُ شيئاً عن بُنَى الذرّات، ولم يكن يملكُ أيَّ تصوّرٍ للأساسِ الذي بُنِيَ عليه الجدولُ، أمّا الآن، فهذا التصوّرُ موجودٌ لدينا. فنحن نعرف حاليًّا أنّ الجدولَ الدوريَّ هو وصفٌ لإيقاعاتِ مَلْءِ مستوياتِ الطاقةِ للذرّاتِ، كما هو مبيّن في الشكل 5-7.

تكوّنت لدينا صورةٌ سريعةُ الزّوالِ عن أصول الدّوريَّةِ في بداية الفصل، وذلك عندما لاحظْنا التشابهاتِ بين الهليوم والنّيون من جهة، وبين الليثيوم والصوديوم من جهة أخرى، وعرفنا أن البُنى الإلكترونية لذرّاتها متشابهةٌ: فللهليوم والنيون ذراتٌ ذاتُ طبقاتٍ مُكتَمِلَةٍ، ولليثيوم والصوديوم ذرّاتٌ يشغَل فيها إلكترونٌ وحيدٌ مداريًّا s خارجَ طبقةٍ مُكْتَمِلَةٍ. هذه الصورةُ هي أصلُ الجدولِ كلِّه. وهكذا، فعندما ننتقلُ من ذرّةٍ إلى أخرى على طول مسار العدد الذرّيّ المتزايد، فإن كلَّ خطوةٍ يزيد العددَ الذرّيَّ واحداً، ومن ثَمَّ يزداد عددُ الإلكترونات التي يجب إيواؤها. وكلُّ إلكترونٍ إضافيٍّ، يَدخُلُ المداريَّ الذريَّ المتاحَ التالي، الذي يحقّق متطلّباتِ مبدأِ الاستبعادِ الذي وضعه پاولي، والذي ينصّ على ألاّ يَشْغَلَ أيَّ مداريٍّ أكثرُ من إلكترونيْن اثنيْن.

وتنسجم هذه المتتاليةَ مع مظهرِ الجدولِ الدوريِّ. وهكذا فإنّ ذرّاتِ عناصرِ الزمرتيْنِ 1 وَ2 (وهما الزمرتان اللتان تحويان الصوديوم والمغنيزيوم، مثلاً) هي تلك التي تشغل فيها المداريُّ s. وبوسْعِ مداريٍّ s إيواءُ إلكتروناتٍ يصل عددُها إلى اثنيْن، وهذا ينسجم مع وجود زمرتيْن في هذا الجزء من الجدول: فيوجد في الزمرة 1 إلكترونٌ واحد في المداريّ؛ ويوجد في الزمرة 2 اثنان. وعلى يمين الجدول، ثمة مجموعةٌ من ستّ زمر: وفي هذه العناصر تكون الإلكتروناتُ منخرطةً في ملء المداريّاتِ p الثلاثة للقشرة المناسبة للذرة: ويمكن لإلكتروناتٍ يصل عددها إلى ستٍّ أن تشغَلَ هذه المداريّاتِ، وتملك عناصرُ الزمرة 13 (مثل البورون B) واحداً من مثل هذه الإلكترونات، وتملك عناصر الزمرة 14 (مثل الكربون C) إلكترونين، وهكذا، إلى أن تُمْلأَ المداريّات في الزمرة 18، الخاملة كلِّيًّا تقريباً، والتي تُسمّى الغازاتِ النبيلةَ noble gases. هذا وإن الشريطَ الضّيِّقَ الموجودَ في وسط الجدول، الذي يحوي المعادن الانتقالية، يتألف من العناصرِ التي تَكُونُ فيها المداريّاتُ d الخمسةُ للطّبقةِ الموافقةِ مشغولةً: فهذه المداريات d الخمسة قادرةٌ على إيواء عددٍ من الإلكترونات يصل إلى عشرة، وهي المسؤولة عن العناصر العشرة عبر كلِّ صفٍّ في هذه المجموعة من الزمر. إن عناصر الانتقال الداخليّ هي تلك التي تشغل المدارياتِ f. ويوجد في أيِّ طبقةٍ سبعةُ مداريّاتٍ f، هي المسؤولةُ عن الأعضاء الأربعة عشر لكل صفٍّ في هذه المجموعة.

●

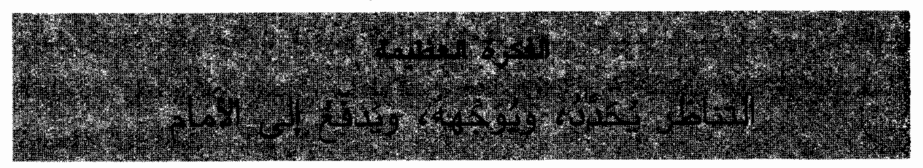
لقد بذلنا جهوداً كبيرةً حتى الآن دون أن نحرز أيَّ تقدم. لقد أدرك كيميائيو القرنِ التاسعَ عَشَرَ القَرابَاتِ العائليَّةَ بين العناصر. وقد عُرِفَتِ المجموعةُ الكاملةُ للعلاقات ـ بقدر ما عُرِف من العناصر ـ بواسطة مندلييف عندما كان القرن التاسع عشر يقترب من نهايته. لكن ترتيبه كان تجريبيًّا، وربّما لم يَجْرِ التوصُّلُ إلى فهمِ سبب لزوم أن يكونَ عنصرٌ قريباً (بالنسب) لآخر. كيف يمكن أن يكون لنوعٍ من المادّة علاقةٌ بنوعٍ آخَرَ؟ وقد حُلَّ هذا السؤالُ عندما أصبحتْ بُنَى

الذرّاتِ مفهومةً في بواكير القرن العشرين. وبعد معرفة النواة وترسيخ القوانين التي تحكم ترتيبَ الإلكترونات في العشرينيات من القرن العشرين، غدا من الواضح مباشرةً أن الجدول الدّوْرِيَّ هو صورةٌ لحلولِ معادلةِ شرودينغر. الجدولُ هو مادة صنعتها الرياضيات. وبناءً على فكرتيْن بسيطتيْن ـ أنّ الإلكترونات ترتّب نفسَهَا بغية بلوغِ أدنَى طاقةٍ ممكنة، وأنه لا يمكن لأكثرَ من إلكترونيْن شَغْلُ أيِّ مداريٍّ معطًى ـ باتَ نموذجُ pattern المادّةِ قابلاً للفهمِ. وتَشْغَلُ الكيمياءُ مكانَ القلبِ في فهمِ المادةِ. وفي صميمِ قلبِ الكيمياءِ تَكْمُنُ الذرّاتُ.

الفصل 6

التّناظر

تَكْمِيمُ الجَمَالِ



يرى كريسيبوس Chrysippus أنّ الجَمَالَ لا يتجلَّى في عناصر شيءٍ، لكنْ بتناظرِ أجزائِهِ(1)

تُرى، أَمِنَ الممكن أن يكونَ الجمالُ هو المدخَلَ إلى فهم هذا العالَمِ الجميلِ؟ لقد أرسَى النّحّاتُ اليونانيُّ بوليكليتوس Polyclitus من آرغوس Argos (420-450 ق.م. تقريباً) أُسُسَ فهمِنَا المعاصِرِ للجسيماتِ الأساسيّةِ عندما كتب في مؤلَّفِهِ **Canon** ـ وهو دليله إلى عِلمِ الجَمالِ ـ ما يلي: «يحدثُ الشيءُ الجميلُ تدريجيًّا، مروراً بكثيرٍ من الأعدادِ». كتب عن التناظر symmetria، وهو الثِّقلُ الديناميّ الذي يوازي بين الأجزاء المسترخيةِ والمتوتّرةِ من الجسم البشريّ، وعن الوظائفِ النسبيّةِ لهذه الأجزاء التي تُسفِرُ عن كلٍّ منسجمٍ. وها نحن، بعد مرور ألفي وخمسمائةِ سنةٍ، نعود إلى السِّمات الرياضيّة للتناظر ـ والسِّماتِ التناظريّةِ لعلم الرياضيّات ـ للتوصل إلى فهمِنَا للعناصرِ الأساسيّةِ التي تتكوّنُ منها المادّةُ، وللثّقلِ الديناميِّ الذي يوازن بين القوى التي تجعل هذه العناصرَ متحدة معاً.

إذا قبلنا أن الجمال يعني التناظرَ ـ الذي استعملَه الرسّامُ التجريديُّ الهولنديُّ مُونْدِرْيَانْ (1872-1944) ـ والغيابَ المقصود للتناظر ـ الذي تتّسم به لوحاتُ الرسّام الفرنسيِّ مونيه Monet (1926-1840) ـ فإن الجمال، عندئذٍ،

(1) يعزى هذا الكلام إلى Galen of Pergamum (129-199) عندما كتب عن بوليكليتوس.
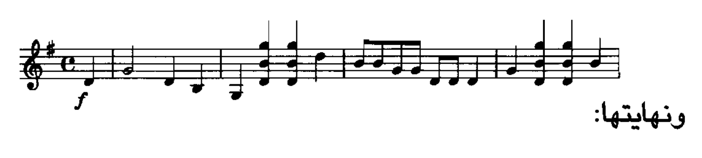
يشغَل مكانَ القلبِ من العالَمِ. بعضُ هذا الجمالِ متاحٌ للفهم المباشر، وذلك يحدث، مثلاً، عندما ننظر إلى مخطَّطٍ متعةً للنّاظرين. لكنّ بعضَه الآخرَ، خفيٌّ جدًّا، وغيرُ واضحٍ للعينِ غيْرِ المثقَّفةِ. وقد مرّ آلاف السنين منذ عهد بوليكليتوس قبل أن يتضح الجمالُ الخفيُّ، وذلك بإلقاء مهمّةِ تقييمِ الجمالِ على الشّكل الرياضيّ، ثم استعمال الأدوات الرياضية للتنقيب في أعماق بحار الحقيقة. وكما سبق وقلتُ، فقد واكب التقدّمَ العلمَيّ تعاظمٌ في تقييم أهميّةِ تجريد المفاهيم العلمية. وقد يكون أفضلَ ما يوضحُ هذا الانتقالَ اكتشافُ التناظرِ وانتسارُه بوصفه أداةً للفهم.

سأوجّهكم الآن، بقدر ما أستطيع من التروّي، إلى سلوك هذا المسار من المحسوسِ إلى المُتَخَيَّلِ، لأبيِّن لكم القوةَ التي يُمدّنها بها التناظُرُ. وسيأخذُنا هذا المسارُ مباشرةً إلى حافةِ الأشياء غير القابلة للتخيّلِ.
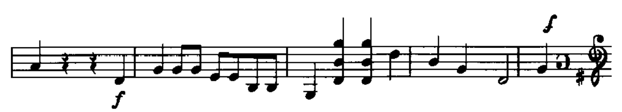
●

يكون جسمٌ تناظريًّا إذا تعرّض لفعلٍ ـ نسميه عمليةَ تَنَاظُرٍ symmetry operation ـ وبقي ظاهرياً على حاله دون تغيير. وبعبارة أخرى، إذا أغمضْتَ عينيْكَ لحظةً، فإنك عندما تفتحهما، لن تستطيع القول ما إذا نفّذت إجراءً على الجسم أم لا، فكّرْ في كرة بسيطةٍ غيرِ مزخرفةٍ؛ أغمض عينيك ثانيةً واحدة؛ ثم افتحهما: تُرى، هل تعرف ما إذا دَوَّرْتُ الكرة؟

إن الأفعال التي يمكن التفكير بها قد تكون دوراناً حول محورٍ، أو تصويراً بمرآة، بيد أنّ ثمة عمليّاتِ تناظرٍ أخرى كثيرةً علينا تخمينها، بعضها اتحاداتٌ معقّدةٌ لعددٍ من الأفعال البدائية، الحركة عبر الفضاء (التي تسمّى انسحاباً translation) التي يعقبها انعكاسٌ في مرآة. ستجد الانعكاسَ reflection في الموسيقى. وأحد الأمثلة الواضحة تماماً، مقطوعة موزارت Mozart الموسيقية، التي قد تكون مزيّفةً، وهي المؤلفةُ من جزءين، والتي بدايتها:



ونهايتها:

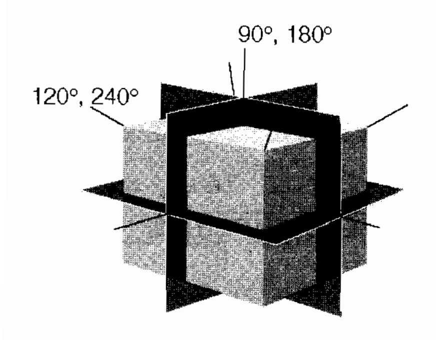


لاحظ أن الجزء الثاني انعكاس للجزء الأول[2].

بعض الأجسام تتّصف بتناظريةٍ أعلى من غيرها. فالكرة تناظرية جدًّا - وهي واحدة من أعلى الأجسام التي نقابلها عادةً تناظراً. فكّر في عدد الطرائق التي يمكنني أن أغيِّرَ بها الكرةَ خلال إغماضك عينيْكَ، والتي لا يمكنكَ اكتشافَها بعد أن تفتحهما. فيمكنن يتدويرها حول أيٍّ من المحاور التي تمر بمركزها، والتي عددها غير منتهٍ، ثم إن زاويةَ الدوران يمكن أن تكون أيَّ زاويةٍ محصورةٍ بين الدرجتين 0 و360. ليس هذا كلّ شيء، إذْ بوسعي تصوّرُ مرآةٍ مارّةٍ بمركز الكرة، وموجّهةٍ بعددٍ غيرِ منتهٍ من الأشكال، ولا يمكنكَ اكتشافُ نصف الكرة الذي انعكس في المرآة وأصبح نصف كرةٍ أخرى. ثمة فعلٌ آخر يمكن أن أنفّذه في خيالي: فبمقدوري تصوّرُ نقل كلّ ذرّةٍ من الكرة وفق خطٍّ مستقيمٍ إلى مركز الكرةَ، ثم تحريكُ الذرّةِ مسافةً لكنْ إلى الجانب الآخر. وبهذه الطريقة أعيد بناء الكرة بالعملية التي تسمى انقلاباً (تعاكساً) inversion. يمكنك القول إنني قد فعلت ذلك، لأن الكرة تبدو حين انقلابها كما كانت تبدو في البداية تماماً.

المكعّبُ أقلُّ تناظراً بكثيرٍ من الكرة. وهاك بعضَ الأفعال التي بوسعي تنفيذها دون أن تعرفَ أنني فعلتُ ذلك. يمكنني تدوير المكعب بزاويةٍ قدرها 90 درجة أو 180 درجة باتجاه دوران عقارب الساعة، أو بعكس هذا الاتجاه، حول محورٍ يمر بمركز أي ثلاثةٍ من أزواج وجوهه المتقابلة (الشكل 6-1). يمكنني أن

(2) من الملائم لهذه المقطوعةِ أن تُعطى رقم كوشيل Köchel 609، لكن المقطوعة الأخرى تعطى اسم ألبرت آينشتاين. ويصنِّفُ ألفرد Alfred هذه المقطوعة ضمن المقطوعات المشكوك فيها (Anh.284dd).



الشكل 6-1 ـ بعض العمليات التناظرية التي تُجْرَى على مكعّب. فالمكعّبُ يبدو على حاله دون تغير عندما ندوّره بزاويةٍ قدرها 90° أو 120° حول محورٍ عموديٍّ على أيٍّ من وجوهه، أو بزاويةٍ قدرها 240° حول محورٍ يمر برأسين متقابلين. أيضاً، يبدو المكعّب ظاهريًّا أنه لم يتغير عند عكسه في أيٍّ من المستويات المبيّنة في الشكل. ثمة عمليتان تناظريتان أخريان: الانقلاب عبر مركز المكعب، والعملية المحايدة (عدم فعل أيِّ شيء).

أدوّره بزاويةٍ قدرها 120° باتجاه دوران عقارب الساعة أو بعكس ذلك الاتجاه حول أيٍّ من المحاور الأربعة المارّة برأسين متقابلين للمكعب. يمكنني عكسه في أيٍّ من المستويات الثلاثة التي يمكنني أن أضع فيها مرآة لقطع المكعب إلى نصفين. يمكنني إعادة بناء المكعب بواسطة انقلابٍ عبر مركزه. حتى أن بوسعي ترك المكعب دون أن يُمَسَّ دون أن تَعْرِفَ ذلك. لذا فإن عدم فعلنا أي شيء ـ وهذا يُسمَّى العمليةَ المحايدةَ identity operation ـ هو أيضاً عمليّةٌ عليَّ أن أُدْخِلَهَا في الاعتبار عند النظر في تناظر شيء. هذه كلها عدّةُ إجراءاتٍ يمكنني القيامُ بها دون أن تَكتشِفَ ذلك؛ لذا فالمكعّب تناظريٌّ جد، لكنه لا يرقى إلى تناظريّة الكرة، حيثُ عددُ العملياتِ التناظريّةِ، التي يُمكن أن أقومَ بها، دون أن تكون قابلةً للكشفِ، غيرُ منتهٍ.

وبمعنًى أكثر دقة، يمكننا القول إن كلَّ شيءٍ تناظريٌّ، ذلك أننا نُدخِل العملية المحايدة ضمن العمليات التناظرية التي علينا دراستها، وحتى أكثر الأجسام اللاتناظرية ـ كصفحة مجعدة من جريدة يومية ـ تظل على حالها، عندما نفتح أعيننا بعد عدم فعل شيء لها. قد يبدو هذا الكلام ضرباً من الخداع، وهو كذلك بالطبع. لكن إدخال العملية المحايدة تضع كل الأجسام ضمن مجال النظرية الرياضية للتناظر، وهذا يسمح لنا باستعمال الحجج التناظرية عند مناقشة كلّ شيء، دُونَ الاقتصار على الأجسام التي نعتبرها «تناظرية». هذه هي الرياضيات: إنها تعمِّمُ التعاريفَ لتوسيع مدى تطبيق المبرهنات theorems قدر الإمكان. وبالطبع، لمّا كان كلُّ شيءٍ تناظريًّا (بهذا المعنى المخادع). فبعض

الأشياء أكثر تناظراً من أخرى. وقولنا «أكثر تناظراً» يعني، ببساطة، أنه يوجد قدرٌ أكبر من الأساليب لتغييرها بحيث أنه عندما نفتح عيوننا، فلا يمكننا معرفة ما إذا نُفِّذَتْ عمليةٌ على هذه الأشياء أم لا. الكرة أكثر تناظراً من المكعب، والمكعب أكثر تناظراً من شجرة نخيل. وكما ترى، فبمقدورنا الآن ترتيب الأجسام وفقاً لدرجة تناظرها؛ فنكهة التناظر لها سمة عددية.

تُسَمّى النظرية الرياضية للتناظر، حيث تقوى هذه النكهة لتتحوّل إلى تعاريفَ وبنًى رياضيةٍ دقيقةٍ، نظريةَ الزُّمَرِ group theory. وتأخذ هذه النظريةُ اسمَهَا من حقيقةِ أنّ عملياتِ التناظرِ التي كنّا نتحدث عنها تكوِّن ما يُسمّى زمرةً group. وعموماً، تتألف الزمرة من مجموعةٍ من الأشياء مزوَّدةٍ بقاعدةٍ للربط(*) بينها، بحيث يكون اتِّحادُ أيِّ زوجٍ من هذه الأشياء عنصراً، أيضاً، من هذه المجموعة. ويمكننا أن نرى سببَ تكوين عملياتِ التناظرِ زمرةً، بالتفكير في المكعّب ثانيةً. لنفترض أنني أقوم بفعلَيْن على التوالي، الأوّل تدوير المكعّب بزاويةٍ قدرها 90 حول محورٍ تشاقوليٍّ، والثاني تدوير المكعب الناتج بزاويةٍ قدرها 120 حول محورٍ قُطْرِيٍّ. النتيجة لا تتغير لو أنني دوّرْتُ المكعّبَ بزاويةٍ قدرها 120 حول واحدٍ من المحاور القطرية الأخرى، لذا فإن العمليتين اللتين تنفَّذان على التوالي تكافئان عمليّةَ تناظرٍ وحيدةً. وهذا يصحّ على جميع عمليات التناظر التي تُجرَى على المكعب، ومن ثم فهذه الأفعال تكوِّن زمرةً(**). هذا وإن زمرَ عملياتِ التناظر التي لها أشكال مختلفة تعطى أسماءً. فزمرة التناظر الضخمة لكرةٍ، مثلاً، تُسمّى SO(3). وسنقابل، في وقتٍ لاحقٍ، زمراً أخرى مثل SU(2) وَSU(3)(3).

إنّ مفهوم الزمرة يتجاوز عملياتِ التناظرِ، وهذا يجعل نظرية الزمر تشغل

(*) يسمي الرياضيون قاعدة الربط هذه عمليةً داخليةً internal operation، أو قانون تشكيلٍ داخليًّا internal law of composition. (المترجم)

(**) الأدق أن يقال إن الزمرة هي ثنائية مؤلّفةٌ من مجموعةٍ (هي المكعب هنا) ومن عملية داخلية (قانون تشكيل داخلي) يحقق شروطاً معينةً، أي أن الزمرة هي مجموعة مزودة بعملية. (المترجم).

(3) تبيّن الأسماءُ بعضَ الخاصيات التقنيّة للزمر، التي نرى أنه من غير المناسب التطرق إليها، باستثناء قولنا إن O هي أول حرف من كلمة «Orthogonal» (عموديّ)؛ وَU أول حرف من كلمة «Unitary» (واحديّ)؛ وَS تعني نمطاً خاصًّا «Special» من هذه الزمر. والعدد 3، على الأقل، يسهل فهمه: إنه يشير إلى عمليات التناظر التي تنفَّذ في فضائنا المألوف الثلاثيّ الأبعاد.

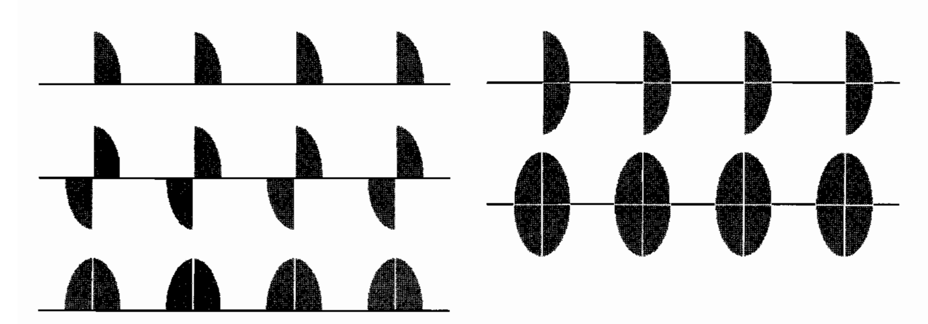
جزءاً هامًّا من الرياضيات، فمثلاً، لنأخذ جميع الأعداد الصحيحة الموجبة والسالبة ...,3,2,1,0,-1,-2,-3-... بافتراضها مجموعة «الأشياء» ولنفترض أن قاعدة الربط هي عمليةُ الجمع. عندئذٍ، لمّا كان حاصلُ جمعِ أيِّ عددَيْن صحيحيْنِ عدداً صحيحاً أيضاً، فإن الأعدادَ الصحيحةَ المزودةَ بعمليةِ الجمع تكوِّنُ زمرةً. لذا فإن علم الحساب جزءٌ من نظرية الزمر، ثم إن الأفكار التي نستعملها للحديث عن تناظراتِ أشياءَ حقيقيةٍ، يمكن تطبيقُها على مناقشةِ أفكارٍ في علم الحساب، وبالعكس. أنا لا أنوي أن أنتقل بك إلى هذا الطريق في هذا الفصل، لكنْ ثمة دورٌ يتعيّن على نظرية الزّمر تأديته في الفصل 10. وفي الوقت نفسه، فقد توصّلنا إلى نتيجةٍ ـ ستعمُّ الكتابَ كلَّه ـ مفادُها أنه يمكن أن يكون لفكرة بسيطةٍ تطبيقاتٌ عموميّتُها ليس لها حدود تقريباً.

●

لنعد إلى التفكير في التناظر نفسه، نحن بحاجةٍ إلى تمييز زمرِ عملياتِ التناظرِ، التي تَتْرُكُ نقطةً من شيءٍ دون تغيير، من الزمر التي تتضمن حركةً عبر الفضاء. الزّمر الأولى تُسمّى الزّمرَ النُّقَطِيَّةَ point groups، ولتسمَّى الثانيةُ الزّمَر الفضائية space groups. إن جميع عمليات التناظر للكرة وللمكعب، تترك نقطةً في مركز كل منهما في نفس موقعها الأصلي. وإذا حرّكَ فعلٌ النقطةَ المركزيّةَ لجسمٍ، كما يحدثُ عندما تُعْكَسُ كرةٌ في مستوٍ لا يمرّ بمركزها، فيمكننا القول عند ذلك إنّ شيئاً ما قد عُمِلَ، وإنّ الفعل ليس عملية تناظر. إنّ كلّ عمليات التناظر التي تُجْرَى على الأجسام المنفردة تترك نقطةً واحدة على الأقل في موقعها الأصلي، لذا فإن تناظرات الأجسام المنفردة تُنْعَتُ بأنها زُمَرٌ نقطيَّةٌ.

هذا وإن النماذجَ التي تمتد عبر الفضاء تُنْعَتُ بأنها زمر فضائية. وهنا لا بد لنا من الخداع قليلاً، والتفكير في النموذج بأنه يمتد إلى اللانهاية في أي اتجاه، أو التفكير في أننا مصابون بقِصَر النظر إلى درجةٍ لا تسمح لنا برؤية ما يحدث في نهايات النموذج. تُسمّى النماذج التي تمتد إلى ما لانهايةٍ في بعدٍ وحيد نماذجَ إفْرِيزِيَّةً frieze patterns، لأنها تُظْهِرُ خاصيّاتِ التناظر النموذجية للإفريزات.

التعريف المتداول لإفريزٍ في الهندسة المعمارية التقليدية هو أي شريطٍ أفقيٍّ مزخرفٍ، تتكرر فيه الزخارف بانتظامٍ على امتداده. وهنا يفتح الماردُ الهاجعُ لنظرية الزمر إحدى عينيه ويزوّدنا بأوّل رؤيةٍ شهيرةٍ له: يوجد خمسة تشكيلات محتملة فقط للإفريز. فكل الإفريزات التي بنيتْ حتى الآن، والتي يمكن بناؤها في المستقبل، يمكن تصنيفها بوصفها واحدةً من التشكيلات الخمسة المختلفة (الشكل 6-2). وبالطبع، قد تكون الأشكال مختلفة ـ رماة سهام، ماسات، عنزات، خربشات ـ بيد أن تحقيقَ شرطِ تكرارِ النموذج دوريًّا (وهذا يستثني بعض الزخرفات الشبيهة بالإفريز، والتي لا تتكرر، مثل رخام إلكين Elgin Marbles) يؤدي إلى تريبٍ في الفضاء محدودٍ بهذه التشكيلات الخمسة.



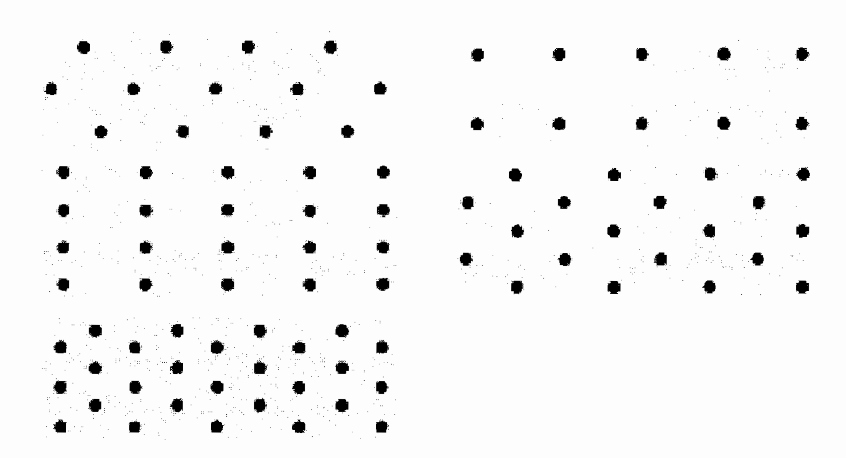
الشكل 6-2. ترمز هذه الأشكال الخمسة إلى الأنماطِ الإفريزيّةِ المسموحِ بها للامتداد بعداً واحداً. يوجد كثير من التصميمات المتباينة، لأن ربع الدائرة الظاهر هنا في اتجاهات مختلفة يمكن أن يستعاض عنه بأي شكل، لكنّ هذه الأنماطَ الخمسةَ هي الأشكالُ التي تمثّل الأساسَ لأيّ إفريزاتٍ منتظمةٍ ممكنةٍ.

هذه أوّلُ لمحةٍ إلى أعماقِ نظريّةِ الزّمرِ التي قد تصيبنا بالدُّوار. وإذا قمنا بقفزةٍ هائلةٍ (لا أنوي أن أقودكم لإنجازها بخطواتٍ صغيرة في هذا الفصل، لكنْ سيكونُ من المفيد معرفةُ الاتجاهِ الذي نسير به)، فربما يغدو بمقدورنا البدء بقبول أنّه مثلما يحدِّدُ التناظُرُ عددَ الأنماطِ الممكنةِ في الفضاء، فقد يَضَعُ تناظرُ الزّمكانِ ـ مهما كان معناه ـ حدوداً لعدد أنماط الجسيمات الأوّليّة التي قد تكون موجودةً. وهكذا فالتناظر يضع حدوداً.

ومع تقدّم فنّ العمارة من المعابد اليونانية إلى البيوت ذات الطابق الواحد،

فإن الطّلب على السطوح القائمة على عدة أعمدةٍ تضاءل، ثم إن الإفريزات مهّدت الطريق أمام استعمال ورق الجدران. وتتوسّع أنماط ورق الجدران بلا تناهٍ في بعدين، وتشكيلات تلك الأنماط التي لها زخرفات فنية متكرّرة مختلفة ـ خطوط، أزهار، طواويس ـ بألوان مختلفة، تملأ كُتُبَ العينات التي يُعدُّها مزخرفو الأجزء الداخلية من البيوت ومصنّعو ورق الجدران. بيد أن نظرية الزمر تُبْرِزُ حقيقةً مروِّعةً هي: يوجد سبعة عشر تكشيلاً فقط لأنماط ورق الجدران.

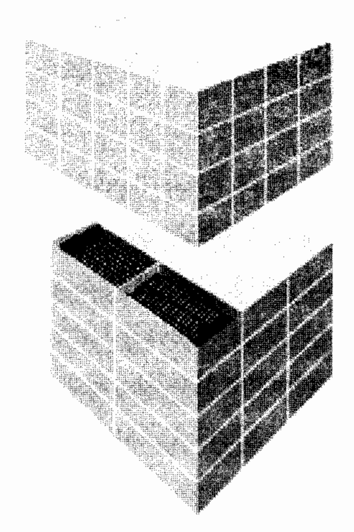
بوسعنا أن نكون أكثر دقّةً. نعني بالشبكة net صفيفاً من النقاط التي تمثل موقع طاووسٍ، أو أي زخرفات متكررة يفرضها الذوق، إن نمط ورق الجدران هو اتحاد للزخرفة الفنية المتكررة والشبكة. وهكذا فإن النقاط المتعاقبة للشبكة قد تحوي طواويس، كلها بوضع منتصبٍ، وقد تحوي تلك النقاط المتعاقبة طواويسَ طائرةً نحو الأعلى أو مقلوبة. وإذا أدخلنا هذا الفرق في اعتبارنا، فإن نظرية الزمر تبيّن أن ثمة خمسة أنماطٍ فقط من الشبكات وسبعة عشر اتحاداً من الشبكات والزخارف الفنية المتكررة (الشكل 6-3). وأنه لتمرينٌ مثيرٌ للاهتمام



الشكل 6-3. تبيّن هذه الأنماطُ الشبكاتِ الخمسَ الممكنةَ لورق الجدران الثنائيِّ البعد. من الممكن إلحاق صور بكلٍّ من النقاط لتوليد التصميم الحقيقي، لكنه حتى عند ذلك، يتبيّن وجودُ سبعَ عشرَة نتيجة ممكنة فقط.

أن تتفحّصَ تركيبَ ورقِ جدرانِ الغرف التي تزورها، ورصفَ فناءات الدُّورِ التي تجتازها، وتركيبَ القرميد على الأسطح، وحتى نقوسَ ربطةِ عنقكَ (إذا كانت منسّقة دوريًّا)، وذلك كتمرين لاختبار قدرتكَ على تعرّف الشبكةِ (وهذا شيء سهل عادةً)، والنمطَ الإجماليَّ (وهذا شيءٌ أصعبُ لأن بعض الزخارف الفنية المتكررة تكون معقدةً). لن تعثر على نمط متكرّر ليسَ واحداً من سبعةَ عشرَ نمطاً، وهذا هو العدد الذي أثبتت نظرية الزمر أنه المجموع الإجمالي إلى لتصميمات ورق الجدران المتكررة دوريًّا.

لننتقل الآن إلى أنماط التغليف الثلاثية الأبعاد التي تملأ الفضاء. تضم الأمثلة في حياتنا اليومية واحداً من أبسط الأنماط كلها، حيث يجري تغليف مكعباتِ السُّكَّرِ معاً في صندوق، أو ـ بتناظر أقل قليلاً، ذلك أن القطعَ المجمّعةَ معاً لم تعد مكعبةً ـ عندما تكدّسُ علبُ الكبريت معاً (الشكل 6-4). يمكننا هنا رؤيةُ أن بإمكاننا نسبَ تناظراتٍ مختلفةٍ إلى ما نقوم بفحصه، لأن علب الكبريت تتكدس معاً لإيجاد تناظر، لكننا إذا أخذنا في الحسبان تصميمَ الصندوق، وربما توجيهَ أعوادَ الثقاب في الصندوق، فإن هذا يقودنا إلى عَزْوِ تناظرٍ أقلّ قليلاً إلى الرَّزمة.

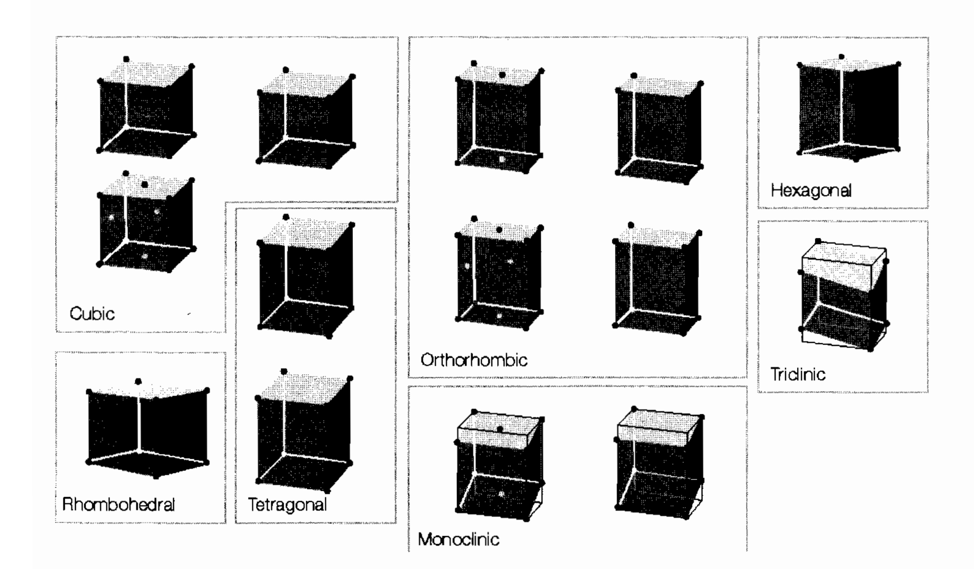


الشكل **6-4**. اثنتان من عمليات التكديس في الفضاء الثلاثي الأبعاد. يبيّن الشّكلُ العلويُّ خلايا واحديّةً مكعبةً (مكعباتٍ من السّكّر) مكدّسَةً معاً. ويُظهِرُ الشكلُ السّفليُّ خلايا واحدِيّةً مستطيلةً (علب كبريت). يوجد ما مجموعه سبعة أشكال لخلايا واحديّة يمكن تكديسها بهذه الطريقة لتوليد بنيةٍ دوريّةٍ. وربّما تحوي الخلايا نفسُها أشياءَ قد تؤثر في التناظر الإجماليّ. وقد بيّنّا القسميْن الداخليينْ من علبتي كبريت اللذيْن يُظْهِرَان أن العلبَ المتعاقبة تحوي أعوادَ ثقابٍ متجهةٍ باتجاهيْن مختلفيْن.

تُرى، ما هو عدد الأنماط في الفضاء الثلاثي الأبعاد؟ بوسعنا هنا كشف النقاب عن تناظرات مختلفة بطرح أسئلة مختلفة. وفي مثال سابق على تقنية الانتقال من الماكروي إلى المكروي transduction، أوردناه في سياق عرضنا لفرضية دالتون الذرية، اقترح القسّ الفرنسيّ المتخصّصُ بعلم المعادن روني - جوست هوي R-J Haüy (1743-1822) عام 1784، في مؤلَّفه بعنوان اختبارٌ لنظريةٍ في بنية البلورات Essai d'une théorie sur la structure des cristaux، أن الهيئة الخارجية للبلورات توضح ترتيب وحداتٍ أصغر. وقد توصّل إلى هذه الرؤية عندما أسقط بلورةً دقيقةً جدًّا من الكالست (وهو صيغة بلورية لكربونات الكالسيوم، أو الطبشور)، ورأى أنها تشظَّتْ إلى قِطَعٍ صغيرةٍ تشبه البلورةَ الأصليّةَ. ومن النادر أن يُسفرَ حَدَثٌ تدميريٌّ عن مثل هذه النتيجة الجيدة. سنطلق الآن على جسمٍ صغيرٍ، إذا كدسنا وحداتٍ منه معاً ملأ الفضاءَ كلَّه - دون أن نلجأ إلى إجراء عملياتٍ تدويرٍ - اسمَ الخليّةِ الواحديّةِ unit cell. قد تكون الخلايا الواحديةُ مكعّبةً (مثل مكعبات السّكّر)، أو مستطيلةً يكون فيها أحد الأبعاد مختلفاً عن البعدين الآخريْن، أو مستطيلةً تكون فيها الأبعادُ الثلاثةُ متباينةً (مثل علب الكبريت)، أو منحرفةً بحيث أنه برغم كونِ الوجوهِ المتقابلةِ متوازيةً (ويجب أن تكون كذلك كي يؤدّي تكديسُ الخلايا الواحديةُ إلى ملء الفضاء كله)، فإنها متعامدة مع جيرانها. وقد تبيّن أنه يوجد سبعة أشكال أساسية من هذه الخلايا الواحدية.

وكما حدّدْنَا خمسَ شبكاتٍ لورق الجدران بملاحظة مواقع النقاط التي فيها فيما بَعْدُ الزخرفاتِ الفنيةَ الدوريّةَ، فإنه يمكننا أيضاً عملُ الشيء نفسه للخلايا الواحدية. يُسمّى الترتيبُ الناتجُ للنقطِ، المسموح به في الأبعاد الثلاثة، شبكياتٍ بْرَافِيَّةً Bravais lattices. نسبةً إلى متسلّق الجبال والمغامر والفيزيائي الفرنسيّ أُوغست برافيه Auguste Bravais (1811-1863) الذي كان أوّل من صنّفها في جدولٍ عام 1850. وقد تبيّن أنه يوجد أربعَ عشرةَ فقط منها (الشكل 6-5)[4].

(4) ثمة موقع يمكنك فيه تدوير الخلايا الواحديّة لتراها من زوايا مختلفة هو:
http//www minweh.co.uk/bravais/bravais.html



الشكل 6-5. النظائر الثلاثية الأبعاد لشبكات ورق الجدران هي شبكيات برافيه. يوجد أربعة عشر شبكية برافية في الفضاء الثلاثي الأبعاد. يمكن ربط نوع من ورق الجدران بكل نقطة بعدد كبير من الطرائق، لكنْ من المستحيل وجود أكثر من 230 ترتيباً.

وحيثما وجدتَ أجساماً مكدسةً معاً لتملأ الفضاءَ كلَّه بطريقةٍ منتظمةٍ، كوضع صفائحِ القصديرِ في صناديقَ، أو بيضٍ مرصوفٍ بعضه فوق بعضٍ في طبقاتٍ، أو فواكهَ معروضةٍ، فإنها جميعاً تنسجم مع واحد من هذه الترتيبات الأربعة عشر.

ومثلما يمكننا الحصولُ على سبعةَ عشرَ نوعاً أساسياً من ورق الجدران بأن نضع زخارفَ فنيةً متكررةً في شبكة النقاط بطرائقَ مختلفةٍ (طواويس منتصبة، طواويس متعاقبة، وهكذا). فبوسعنا إلحاق زخرفٍ (مثل الشكلِ الموجود على مقدمة علبة الكبريت، أو الطريقة التي تُرَتَّبُ بها عيدان الثقاب داخلها) بكل نقطة من شبكيةٍ برافيَّةٍ. وتظهر الدراسةُ المتروِّيةُ بهذه الأنماط الناتجة أنه يوجد **230** ترتيباً ممكناً فقط. قد تبدو كلمةُ «فقط» غيرَ ملائمةٍ هنا؛ لكن الواقعَ هو أنّ العددَ منتهٍ ومحدَّدٌ بدقَّةٍ. إنه ليس 228 أو 229، إنه 230 بالضبط. تسمّى هذه الترتيبات زمراً فضائيةً space groups، وكلّ التصميماتِ الثلاثية الأبعاد التي

تملأ الفضاء دوريًّا، توافقُ هذه الزمرَ الفضائيةَ التي عددها 230. إن رَزْمَ علب الكبريت غيرِ المزخرفةِ والمتطابقةِ شكلاً، التي تحوي عيدان ثقاب باتجاه واحد، يُقَابِلُ زمرةً فضائيةً واحدةً، أما علب الكبريت نفسها التي لها نفس الترتيب، لكن التي تحتوي العلب المتجاورةُ فيها على عيدان ثقاب ذات اتجاهات متغيرة بالتناوب، فتقابل زمرة فضائية أخرى.

●

وعندما يقوم بائع الفواكه في دكانه بترتيب حبّات البرتقال بغية عرضها على زبائنه، فهو يقوم بدون وعيٍ منه بنمذجة طرائق الطبيعة في تكديس الذرات معاً لتكوِّن بلوراتٍ، وهنا، يصبح التناظر والزمر الفضائية التي يمثلها، أداةً هامة للدراسة والتصنيف. فأولاً، يمكننا أن نستنتج من عرض بائع الفواكه أن ثمة مستوياتٍ منبسطةً تقريباً يمكن أن تنشأ من التكديس المنتظم للكرات. والسطح المنبسط لبلورة وحيدة من عنصر معدنيّ، مثل الزنك أو النحاس، هو أحد هذه السطوح. وليس هذا هو المكان المناسب للدخول في تفصيلات الطريقة التي تتجمّع بها الذرات والزيئات معاً لتشكل واحداً من الترتيبات المحتملة التي عددها 230، والتي يسمح بها التناظر.

وإذا فكّرنا في الذرات أنها كراتٌ صلبةٌ، فبوسعنا تخيُّلُ طبقةٍ من هذه الذرات قريبة بعضها من بعض، وكلٌّ منها محاطٌ بستة جيران (أكبر عدد ممكن للكرات المتطابقة). ومن الممكن تشكيل طبقة جديدة بوضع ذرةٍ في كلٍّ من الانخفاضات الموجودة في الطبقة الأولى (الشكل 6.6). ومن الممكن تشكيل طبقة ثالثة بإحدى طريقتين: ففي الأولى، نضع الذرات في المنخفضات الموجودة فوق مواقع الذرات في الطبقة الأولى؛ وفي الطريقة الثانية، نضعها في المنخفضات الموجودة فوق الفجوات الموجودة في الطبقة الأولى. فإذا رمزنا إلى الطبقات بالأحرف ...,A,B,C، فإن الترتيبَ الأوّل هو ...ABABAB، والثاني ...ABCABC. وإذا أمْعَنْتَ النّظرَ في الترتيب الأول للكرات، وجب عليك أن تكون قادراً على تمييز ترتيب سداسي، وهو خليّةٌ واحديّةٌ سداسيَّةٌ. وفي الترتيب الثاني، يتعين

الشكل 6-6. يمكن إنشاءُ بنيتيْن منتظمتيْن بتكديس كراتٍ صلبةٍ (تمثل ذراتٍ) معاً بحيث يكون بعضها قريباً من بعضٍ قدر الإمكان. وفي أدنى مستوًى (اللون الرمادي الفاتح)، تكون كلّ كرة مماسةً لِسِتِّ كراتٍ مجاورةٍ. ونُسمّي هذا المستوَى A. وفي المستوى الأوسط (اللون الرمادي المتوسط) توجد الكراتُ في منخفضاتِ الطبقة الأولى، ونسمّي هذا المستوَى B. وإذا وقعتْ كراتُ الطبقةِ التالية (اللون الرمادي الغامق) في منخفضات الطبقة الثانية الموجودة فوق كرات الطبقة الأولى مباشرةً، كي توفّر بنيةَ ABA، فإننا نحصل عندئذٍ على بنيةٍ سداسيّةٍ (الجزء العلويّ). وإذا وقعت الكرات في المنخفضات غير الموجودة مباشرةً فوق كرات الطبقة A، فإننا نحصل على ترتيبٍ ABC الذي له تناظرٌ مكعّبي.

عليك أن تكون قادراً على تمييز ترتيبٍ مكعَّبيٍّ (وهذا التمييز أصعب قليلاً من سابقه لأن المكعّب متعرج فوق المستويات). لذا فإن هاتين الطريقتين في تجميع الذرات تنتجان بلوراتٍ لها تناظرات متنوّعة. وبعض المعادن التي تشكّل خريا واحديَّةً سداسيَّةً هي الكوبالت، والمغنيزيوم، والزنك. وتضمّ المعادن، التي تشكّل خلايا واحديةً مكعبةً، الفضة، والنحاس والحديد.

إن تناظر خليّةٍ واحديةٍ تؤثر في الخاصيات الميكانيكية والكهربائية للموادّ الصلبة. فمثلاً، تتوقّف صلادة معدنٍ على وجود مستوياتٍ انزلاقيةٍ slip planes، وهي مستوياتٌ من الذرات التي يمكن أن ينزلق بعضها على بعض عندما

تتعرض لإجهادٍ، مثل ضربةٍ مطرقةٍ. وعندما يجري فحصُ ملاءاتِ الذراتِ في الشكل 6.6، أو الخلايا الواحديّةِ، بشيء من التروِّي، يتبيّن أن للشكل السداسيّ مجموعةً واحدةً فقط من المستويات الانزلاقية (فهي توازي المستويات المبيّنة في الشكل)، في حين يمتلك الشّكلُ المكعّبُ ثماني مجموعاتٍ من المستوياتِ الانزلاقية باتجاهاتٍ مختلفةٍ. والنتيجةُ هي أن المعادنَ ذاتَ البنيةِ السّداسيّةِ (الزنك، مثلاً) تكون هشّةً، في حين تكون المعادنُ ذاتُ البنيةِ المكّعبةِ (النحاس والحديد، مثلاً) مطواعةً وقابلةً للطّرْق، إذ يمكن حنْيُها، وتسطيحُها، وسحبُها، وجعلُهَا تتّخذ أشكالاً مختلفةً بسهولةٍ نسبيًّا وتعتمد الصّناعاتُ الكهربائيةُ على قابليّةِ النّحاسِ للسَّحب والتطريق، في حين تعتمد صناعتا النّقل والبناء على مطواعيّة الحديد.

وكما سبق ورأينا في سياقاتٍ أخرى، فإن توسيع تفكيرنا ليمتد إلى أبعاد أعلى، شيءٌ مُسَلٍّ أحياناً، وغالباً ما يكون مفيداً. هذا التمديد ضروري أحياناً، وهذا يحدث عندما ننظر في الأبعاد الأربعة للزمكان. عندئذٍ يبرز السؤال عن عدد الأنماط التي يمكن وجودها في فضاءاتٍ لها أبعاد أكثر. وقد درستِ الرياضياتُ هذه المسألةَ، ووجدت أنّ ثمة 4783 زمرة فضائية «فقط» في أربعة أبعاد، لذا فإن المخلوقات الموجودة في فضاء خماسيّ الأبعاد (التي تحتاج إلى ورقٍ جداري ذي أربعة أبعاد لتزيّن به غرفَها الفَوْمُكَعَّبَةَ hypercubic) ستجد تنوعاً أوسعَ لأنماط أوراق جدرانها في فَوْ أسواقها hypermarkets، ممّا يتوفّر لنا نحن المخلوقات التي تعيش في الفضاء الثلاثي الأبعاد.

●

ليست كلّ التناظرات متّسمةً بالوضوح، وأرى عند هذه النقطة أن من المناسب العودة إلى البداية لتقدير الجمال الذي يوفره لنا زيادة التجهيد. لا مفرّ من أن تصبح دراستنا من الآن فصاعداً أكثر تجريداً، وأن تغدو المفاهيمُ أصعبَ تصوّراً؛ لكننا سنتجاوز هذه المخاطر المحجوبة ببطءٍ وَتَرَوٍّ، وستُسَرُّ عندما تكتشفَ أن باستطاعتكَ استيعابَ تلك المفاهيم. وهنا، سنرى أن التناظر لن يكون أداةً وصفيةً فقط، بل قوية أيضاً، إذ إنه مصدر القوانين؛ فالتناظر يوجهنا ويرشدنا.

لقد سبق ورأينا مثالاً للقوة التوجيهية والتحكّميّة للتناظر. فقد ورد في الفصل 3 أن انحفاظ الطاقة نتيجةٌ لانتظام الزمن. إن كون الزمن سلساً، ويفتقر إلى تكتلات ـ وبعبارة أخرى، إن كون الزمن لامتغيراً انسحابياً translationally invariant ـ يقتضي أن تكون الطاقة منخفظةً. رأينا أيضاً أن انحفاظ الاندفاع الخطّيّ نتيجةٌ لسلاسة الفضاء ـ أي أن الفضاء لا متغير انسحابياً في غياب القوى ـ وأن الاندفاع الزاويّ نتيجة لتناحي isotropy الفضاء ـ أي أن الفضاء لامتغير دورانياً rotationally invariant في غياب عزوم الفتل torques. إن عدمَ وجود تكتلات للفضاء والزمن سمةٌ لتناظرهما، لذا فنحن نرى أن قوانين الانحفاظ الفعّالة هذه تنشأ من التناظر. هذا وإن إيمي نوتر E. Noether (1882-1935)، وهي أكثر عالمة في الرياضيات تأثيراً وتميزاً في العالَمِ حاربها الزمان، توصلت إلى نتيجةٍ جدّ مهمة تسمى مبرهنة نوتر Noether's theorem، فحواها أنه حيثما يُوجد تناظر، فإنه يوجد دائماً قانونٌ مقابلٌ للانحفاظ.

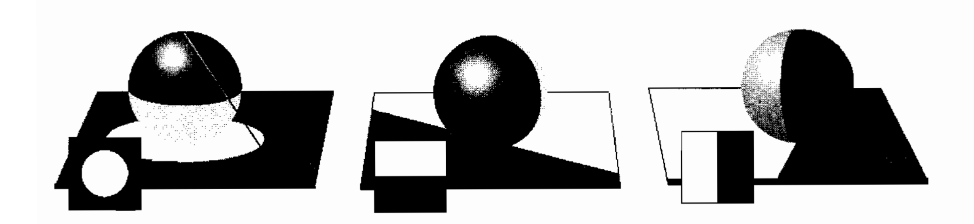
ثمة بعض التناظرات الخفيّة على الملاحظة، لكنّ لها، مع ذلك، نتائج. وهنا، كلّ ما أطلبه منك فعله هو ملاحظة بعض المصادفات والتفكير فيما إذا كانت نتيجة للتناظر. وهناك إشارة على أن التناظر مستتر تحت سطح المظاهر هي التساوي الكامل لطاقات ترتيباتٍ مختلفةٍ للجسيمات: فإذا كان ترتيبان مرتبطين بعملية تناظر، فإن طاقتي هذين الترتيبين متساويان. وفي الفصل 5، قابلنا مثالاً يبين ذلك، حين رأينا أن طاقة إلكترونٍ في ذرّة هدروجين تظل على حالها حين يشغل الإلكترون مداريًّا s، وحين يشغل أيًّا من المداريّات p الثلاثة لنفس الطبقة. إن المداريّ s كرويٌّ، وللمدرايٍّ p فصّان، لذا فمع أن من السهل رؤية أن من الممكن تدوير مداريٍّ p ليتحوّلَ إلى مداريٍّ p آخر، فليس من الواضح مطلقاً أنّ من الممكن تدوير مداريٍّ p ليتحوّل إلى مداريٍّ s. وقد ذكرت آنذاك أن الطاقةَ الكامنةَ ـ وهي الطاقة الناشئة من وضع إلكترونٍ في حقلٍ كهربائيٍّ لنواةٍ، والتي تُسمَّى الطاقة الكامنة الكولونية Coulomb potential energy ـ جميلةٌ بوجهٍ خاصٍّ، ويمكنني الآن تفسير ما كنت أعنيه.

الطاقة الكامنة الكولونية تناظرية كرويًّا، أي أنه حيثما وضعنا الإلكترون

على مسافةٍ معطاةٍ من النواة ـ في القطب الشماليّ، أو القطب الجنوبي، أو على خط الاستواء، أو في أيّ مكان في الوسط ـ فإن طاقته الكامنة تظلّ على حالها دون تغيير. الطاقة الكامنة تتغيّر بتغيّر المسافة عن النواة، لكنها مستقلة عن البعد الزاويّ عن النواة عندما لا تتغيّر تلك المسافة. ويُخبرنا هذا التناظرُ الكرويُّ أن التحويلاتِ التناظريةَ symmetry transformations للذرة تتضمّن دوراناتٍ بأي زاوية حول أي محور، وهذا يشبه تماماً العملياتِ التناظريةَ لكرةٍ. وهكذا فمن الممكن تدوير المداريات p الثلاثة ليحلّ كلٌّ منها محلَّ الآخر بإجراء عمليةٍ تناظريّةٍ للكرة، ومن ثَمَّ فإن طاقاتها واحدة. ومع ذلك، فما زال يبدو أنه لا يمكننا تدوير مداريٍّ s ليتحول إلى مداريٍّ p.

وفي هذا السياق تَرِدُ حقيقةٌ استثنائيةٌ فحواها أن الطاقة الكامنة الكولونية رائعة، بمعنى أن لها تناظراً دورانيًّا، لا في ثلاثة أبعاد فحسب (كما سبق ورأينا)، لكنْ أيضاً في أربعة أبعاد. ويعني هذا التناظر العالي أنه قد يوجد دورانٌ في أربعة أبعاد يحوِّل مداريًّا s ثلاثيَّ الأبعاد إلى مداريٍّ p ثلاثي الأبعاد. وإذا كان الأمر كذلك وكان بإمكاننا أن نحوّل الأنواعَ المختلفة من المداريات بعضَها إلى بعضٍ، فعندئذٍ يكون لها نفس الطاقة.

أنا أدركُ أنه لا يحقّ لي أن أطلب منك الآن التفكيرَ في الفضاء الرباعي الأبعاد، لأن هذا يتجاوز واجبك (على الأقل، حتى الوصول إلى الفصل 9)، لذا سأستعمل بدلاً من ذلك تشبيهاً جزيئاً بسيطاً، فكّرْ في أنّ كرةً مستقرةٌ على مستوٍ. يمثل المستوي عالَمَنَا الثلاثيّ الأبعادِ، والكرةُ عالماً رباعيّ الأبعاد لا نرى منه سوى مسقطاً، لنفترض أننا نلوّن النصف الشماليّ من الكرة باللون الأسود ونصفها الجنوبي باللون الأبيض. يمكننا رسم خطٍّ مستقيم من القطب الشمالي ونسقطه عبر سطح الكرة على المستوي. يبدو هذا المسقط للكرة المنمذجَة مثل دائرة (الشكل 7-6). دوّر الآن الكرة بزاوية قدرها 90° لتأخذ الوضع المبيّن في القسم الثاني من الشكل. إن المسقط الجديد يقسم المستوي إلى نصفين، أحدهما أسود والآخر أبيض. وهناك توجيه آخر للكرة مبيَّن في القسم الثالث (الأيمن) من الشكل، وله مسقط مشابه، لكنه مدوّرٌ بزاويةٍ قدرها 90°. نحن، المقيمين على



الشكل 6-7. تمثيل لإمكان تحويل المداريات s والمداريات p بعضها إلى بعض، بزيادة بعدٍ واحد. تمثّل المداريات بنماذج في فضائي ثنائي البعد. وإذا قبلنا أن هذه النماذج هي مساقط كرة في فضاءٍ ثلاثي الأبعاد على فضاء ذي بعدين، عندئذٍ يمكننا رأية أن تدوير الكرة يبادل بين النمادج في بعدين. وللكمون الكولوني تناظر ذو أربعة أبعاد، وهو يسمح لهذا النمط من الدوران أن ينفّذ.

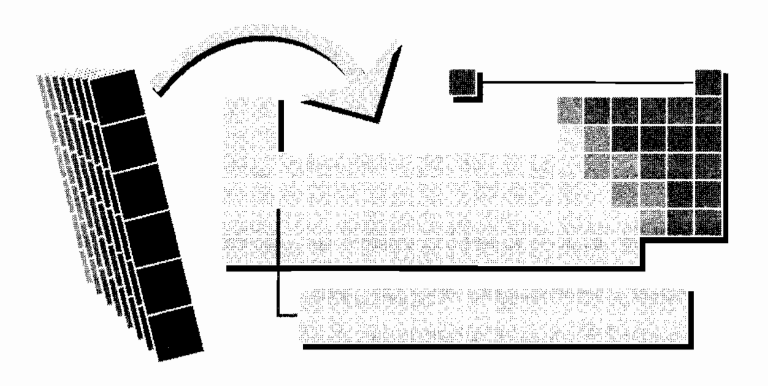
الأرض المنبسطة، نجد من المعقول تماماً أن من الممكن ربط المسقطين الثاني والثالث بدورانٍ، لذا لن نفاجأ بأن يكون لهذين «المداريّين p» نفس الطاقة. ونحن نجد من المحيّر في الواقع أنه يمكن تحويلهما إلى المداريّ الأول ذي الشكل الدائري. لذا لا نستطيع أن نرى إنّ «لمداريٍّ s» نفسَ طاقةِ المداريّيْن p. هذا وإن المراقب في الفضاء الثلاثيّ البعد لا يعاني هذه المشكلة: إذ إنه يرى النماذج على أرضنا المنبسطة مساقطَ كرةٍ مرتبطة بدوراناتٍ بسيطةٍ. ويمكن تطبيق نفس هذه المحاكمة على مداريّات ذرّة هدروجين، ونرى أن المساواة بين طاقاتِ مداريّاتٍ لا يرتبط أحدها بالآخر ظاهريًّا هي نتيجةً لوجود تناظرٍ مستترٍ في بعدٍ رابعٍ.

وهاك فكرةً أخرى جدّ قوية ستؤتي ثمارها عمّا قريب. إن طاقة إلكترونٍ في مداريٍّ s لا يساوي بالضبط نفس طاقة إلكترونٍ في مداريٍّ p. العلماء يعرفون أن السبب في ذلك هو وجود تفاعلات مغنطيسية ضعيفة بين الحركة المدارية للإلكترونٍ وتدويمه، وهذا يزيح الطاقاتِ قليلاً. هذا مثال على انكسار التناظر symmetry breaking، وهي عملية تتسم بأنه على الرغم من وجود علاقةِ تناظرٍ في الخلفية، فإن تفاعلاتٍ ضعيفةً أخرى تجعل طاقات الحالات المختلفة يختلف بعضها عن بعض. وثمة طريقة ثانية للنظر إلى أثر انكسار التناظر، هي تذكّرُ أنه وفقاً لنظرية آينشتاين في النسبية الخاصة، فإن الطاقة والكتلة متعادلتان ($E = mc^2$، الفصل 9)، لذا فنحن نعبّر عن التباين في طاقات الإلكترونات في المداريّات s والمداريات p بوصفها تبايناً في الكتلة. وبعبارة

أخرى، تنشأ التبايناتُ في الكتلة من تفاعلات انكسار التناظر. والتباينُ في الطاقة في هذه الحالة طفيفٌ جدًّا، ومن ثَمَّ فإن التباينَ في الكتلة الناشيءَ عن انكسار التناظر طفيف جدًّا ولا يتجاوز $1x10^{-37}$ غرام؛ ومع ذلك، فإن هذا التباين الذي يمكن إهماله كليًّا، سيتطور إلى نقطةٍ هامة في الحقيقة.

إن هذا الجمال اللافت للنظر للطاقة الكامنة الكولونية ذات التناظر المركزي، والتي ستكون أروع نمطٍ من الطاقة الكامنة يمكن تصوره، يُفْقَدُ حَالَمَا يوجد إلكترون ثانٍ في الذرة. وكما رأينا في الفصل 5، فإن مستويات الطاقة في ذرة هيدروجينٍ هي تقريبٌ أَوَّلٌ لمستوياتِ طاقةِ جميع الذرات. عندئذٍ، إذا ما سمحنا للتغيرات في الطاقة الناشئة من التنافر الكهربائي بين الإلكترونات (الذي يؤدي، مثلاً، إلى إلكترونات في مداريات s لها طاقة أقل قليلاً من طاقة الإلكترونات في المداريّات p)، فإن بنية الجدول الدوريّ تنشأ تلقائيّاً. بيد أن ثمة طريقةً أخرى أكثرَ تعقيداً، ومبنيةً على التناظر، لفهم أهمية الجدول الدوري.

وبتقريبٍ أوّلٍ، يمكننا التعبير عن بُنَى ذرّات جميع العناصر بدلالة ما تشغله المداريّات الذرية الشبيهة تماماً بمداريّات ذرة الهيدروجين. ولما كانت طاقاتُ المدارياتِ في أيِّ طبقةٍ متساويةً، فإنّ تلك المقاربةَ تؤدي إلى جدول دوري طريف، لأن للمداريّاتِ p والمدارياتِ s (وأيضاً للمدارياتِ d والمدارياتِ f) بطبقةٍ ما نفسَ الطاقةِ؛ لذا فنحن نفقد بنية الجدول، وعندئذٍ لا يبدو أن ثمة سبباً لوجود شخصيات كيميائية متنوعة للعناصر. ويمكنكَ، إنْ أردتَ، التفكيرُ في زُمَرِ الجدول (الأعمدة الرأسية) بوصفها غيرَ مميَّزةٍ ومكدّسةً إحداها فوق الأخرى. لكنْ لما كانت الإلكتروناتُ يتفاعل أحدُها مع الآخر، وتكسر التناظر الرباعيَّ البعدِ للطاقة الكولونية، فإن المداريات s والمداريات p لطبقةٍ معطاةٍ لا تمتلك نفس القدر من الطاقة. وما إن نسمح لانكسار التناظر هذا بالحصول، فإن الجدول الدوريّ يتخذ شكلاً لغرفه (الشكل 6-8). لذا فإن الكيمياءَ التي يصوّرها الجدولُ الدوريُّ هي في الحقيقة صورةٌ للتناظر الرباعيّ الأبعاد للطاقةِ الكمونية الكولونية الذي كسرته التفاعلات بين الإلكترونات الموجودة في كلّ ذرةٍ. ومن وجهة النظر هذه، فإن الكيمياء، في الأصل، هي صورة للتناظرِ وكَسْرِه؛ إنها فقدانك للتناظر الكامل الذي



الشكل 6-8. هذا شكل تصوّري لبنية الجدول الدوري. وإذا أهملنا التفاعلات بين الإلكترونات، فكل إلكترون يخضع للطاقة الكامنة الكولونية العالية الطاقة للنواة، وعندئذٍ لا يمتلك الجدولُ الدوريُّ بنيةً (وتكون الأدوار سليمة)؛ وهذا مُمَثَّلٌ بالمجموعة المكدّسة من الزمر الموضّحة في يسار الشكل. وعندما نسمح بانكسار التناظر (أي عندما نُدخل في الحسبان التنافرات بين الإلكترونات)، فإن الزمر تنتشر في البنية المألوفة للجدول الدوري.

يزوّد العناصر الكيميائية بشخصياتها المميِّزة، كان مندلييف يعرف القليلَ عن التناظر، ولا يعرف شيئاً عن التناظر المستتر، ويعرف حتى القليل القليلَ عن انكسار التناظر. وآمل أن يكون قد أُعجب بفكرة أن جدوله هو صورة لنتائج تناظر الطاقة الكمونية الكولونية المنكسر (بسبب التفاعلات بين الإلكترونات).

ثمة المزيد مما نريد قوله. رأينا في الفصل 5 أنه يُحَالُ بين الإلكترونات وتجمّعها في نفس المداريِّ استناداً إلى مبدأ باولي في الاستثناء، الذي لا يسمح لأكثر من إلكترونيْن اثنيْن بالدخول في داريٍّ واحد، وإذا شغل إلكترونان فعلاً مداريًّا واحداً، فإن تدويمهما يجب أن يُزَاوَجَ (أحدهما يدوِّم باتجاه دوران عقارب الساعة، والآخر يدوّم بعكس هذا الاتجاه). هذا المبدأ متأصِّلٌ أيضاً في التناظر، لذا فإن شكل الجدول الدوري، وحقيقة أن الذرات لها حجم، وملاحظة أننا متميّزون ممّا يحيط بنا، كلُّ هذا متأصِّلٌ في التناظر. وكما سنرى الآن، فالتناظر الذي يُبْنَى عليه مبدأ باولي هو نوع دقيق، لكن ليس من الصعب كشفه.

ولما كنا لا نستطيع، وفقاً للنظرية الكمومية، تتبُّعُ مساراتِ أيِّ إلكترونٍ،

فإن أي إلكترون في العالَمِ لا يمكن أن يُمَيَّز إطلاقاً من أيّ إلكترونٍ آخر[5]. ويُوحي عدم إمكان التمييز هذا أنه إذا أردنا أن يحلّ أيُّ إلكترونين كلٌّ محلَّ الآخر في ذرة، فلا بد أن تبقى جميع خاصيات الذرة دون تغيير.

في هذه المرحلة، أحتاج إلى تعميم مفهوم المداريّ قليلاً، وتوقُّع سمةٍ أو سمتين للمناقشة المستفيضة التي أوردناها في الفصل 7؛ وإذا ما أزعجتْكَ الناقشةُ التي سنوردها هنا، فَعُدْ إليها بعد قراءتك للنصف الأول من ذلك الفصل. لقد رأينا أنّ المداريّ يخبرنا عن احتمال وقوع إلكترونٍ في ذرة. المداريّ هو حالة خاصة من الدّالَّةِ الموجيَّةِ wavefunction، التي هي حل معادلة شرودينكر لأي جسيمٍ من أي نوعٍ من البيئة، لا مجرد إلكتروناتٍ في ذرّاتٍ. سنستعمل هذا المصطلح الأعمّ من الآن فصاعداً. الأمر الثاني الذي نحتاج إلى عرفته هو، أن احتمال العثور على جسيمٍ في أي نقطة ـ الذي مثلناه حتى الآن بكثافةِ تظليلٍ ـ يُعطَى بمربع قيمة الدالّة الموجية في تلك النقطة[6]. إن أحد اقتضاءات هذا التفسير هو أن للدالة الموجيّة وسلبيّتِها (أي الدالة المسبوقة بالإشارة المعاكسة) نفس الأهمية الفزيائية (لأن لمربّعيْهما نفسَ الإشارة). وهذا يترك احتمالاً مفتوحاً واحداً هو أن الدالة الموجيّة قد تغير إشارتها عندما يجري المبادلة بين إلكترونينْ: فنحن ببساطة لن نلاحظ ذلك. هذا هو الحال في الواقع. وقد وجد باولي أنه قد يفسر بعض تفصيلات الإشعاع الصادر عن الذرات. في تلك الحالة فقط التي تغير فيها الدّالةُ الموجيّةُ للذرة إشارَتَها عندما يتبادل إلكترونان موقعيْهما. ونقول عندئذٍ إن الدالة الموجيّة يجب أن تكون ذات تناظر مضاد antisymmetric (أي أنها تغير إشارتها) نتيجةَ التبادل بين الإلكترونين. ويُستنتَجُ مبدأ باولي في الاستثناء، الذي ينص على أنه لا يمكن لأكثر من إلكترونين شَغْلُ أيّ مداريٍّ ذريٍّ، من هذا المتطلَّب

(5) اقترح ريتشارد فاينمان R. Feynman، في مكالمةٍ جرت بينه وبين جون ويلر J. Wheeler ـ لكنْ بكلامٍ بين الجدّ والدعابة ـ أن السبب في أن جميع الإلكترونات متماثلةٌ هو وجود إلكترونٍ واحدٍ في العالَم، وما نظنّه أنه عدة طبقات من الإلكترونات، هو في الحقيقة، طبقة واحدة يقع عليها مسار إلكترون خلال تجوّله عليها خلال الزمن وهذا لا بد أن يكون عالَماً اقتصادياً.

(6) ثمة مناقشة مطوّلة في الفصل 7 لمسألة تفسير الدوال الموجية والاحتمالات.

الأقوى، لذا فإن بنية الذارت، وحجمها، وحجمنا نحن، ينشأ من التناظر.

●

نحن جاهزون الآن للارتقاء درجةً في سلّم التجريد، وآملُ أن يكون عقلُكَ الآن مهيّأً لذلك. كلّ شيء تقريباً تحدّثنا عنه حتى الآن، كان يُعنَى بخاصية التناظر التي تحدث في الفضاء. لكن الحياة أوسع من الفضاء، وعند هذه النقطة، علينا توجيه انتباهنا للتناظرات الداخلية internal للجسيمات، وهي تناظرات تتعلق بالأعمال التي يمكن أن نجريها على جسيمٍ مثبتٍ بنقطة من الفضاء، مثل فراشةٍ في معرض للفراشات، لا تستطيع الحركة عبر الفضاء، لكن يمكن عكسها وتدويرها وقلبها.

بعض هذه التناظرات - التي سيتبين أنها شبه تناظرات، تناظراتٌ منكسرة - يسهل تصوّرها. سنبتدىء بمركّبتي النواة اللتين قابلناهما في الفصل 5: البروتون والنيوترون، اللذان لهما اسم مشترك هو النكليون nucleon. من المُشْتَبَهِ به أن هذين الجسيمين متشابهان: فلهما كتلتان متشابهتان (النيوترون أثقل قليلاً، أي أن له طاقةً أعلى بقليل)، ولكلٍّ منهما الخاصية التي نسمّيها تدويماً spin. الفرق الأساسي بينهما هو أن البروتون مشحون، لكن النيوترون ليس مشحوناً. وإذا أهملنا مؤقّتاً هذا الفرق في الكتلة، فإن الجسيمين توأمان، أي أنه يوجد تناظرٌ بينهما. ويفكّر علماء فيزياء الجسيمات في هذا التناظر على أنه خاصيّةٌ تُسمّى التدويم (السبين) النظيري isospin (لأن خاصياتِهِ مشابهةٌ للتدويم ذاته). ويقابلُ التدويمُ النظيريُّ باتجاهَ دورانِ عقاربِ الساعةِ شحنةً كهربائيةً «on» (البروتون)؛ أما التدويم النظيري بعكس اتجاه دوران عقارب الساعة فيقابل الشحنةَ الكهربائية «o» (النيوترون). الجسيمان هما شيء واحد حقًّا؛ أحدهما (البروتون) وهو نكليون ذو تدويم نظيري باتجاه دوران عقارب الساعة، والآخر (النيوترون) هو نكليون ذو تدويم نظيري يعكس اتجاه دوران عقارب الساعة، ولتحويل بروتون إلى نيوترون، فكلّ ما علينا عمله هو عكس تدويمه النظيري.

هذا وإن خاصيات النكليون، بالتقريب الأول، متسقلةٌ عن اتجاه تدويمه

النظيري. بيد أن التناظر بين التدويم النظيري باتجاه دوران عقارب الساعة والتدويم النظيري بعكس اتجاه دوران عقارب الساعة ليس كاملاً، وهو منكسر قليلاً بواسطة التفاعلات الأخرى، كتفاعل النكليون مع الحقول الكهرمغناطيسية. إن طاقة تفاعلِ حقلٍ كهرمغناطيسيٍّ تختلف في حالة التدويم النظيري باتجاه دوران عقارب الساعة عنها في حالة التدويم النظيري بعكس ذلك الاتجاه. لذا فإن كتلتي حالتين للنكليون مختلفتان قليلاً، إذ تبيّن أن الكتلة من الحالة التي يكون فيها التدويم النظيري بعكس اتجاه دوران عقارب الساعة (نيوترون) تكون أقل قليلاً من الكتلة في الحالة التي يكون فيها التدويم النظيري باتجاه دوران عقارب الساعة (بروتون).

إن تعرّف تدويمٍ نظيريٍّ (وفق هايزنبرك Heisenberg) يشبه اكتشاف ثلاثياتٍ triads من العناصر من قِبَل دوبيرينر Döbereiner قبل قرنين من الزمان (الفصل 5). وقد تعرّف دوبيرينر قَطَفاً من نموذجٍ إجماليٍّ تَعَرَّفَهُ في الوقت المناسب مندلييف، ورأى فيه صورةً لتناظرٍ منكسرٍ بتفاعلاتٍ ضعيفة، فهل من الممكن أن تكون الجسيمات الأولية مرتبطاً بعضها ببعض بتناظرٍ، وأن تكون كتلها المختلفة نتيجة انكسارِ التناظر؟ هل ثمة جدول دوري للجسيمات الأولية، وهل ذلك الجدول متأصّلٌ في التناظر وضياعها الجزئي؟

لا بد لنا من العودة إلى الوراء قليلاً. كان مندلييف قادراً على تجميع جدوله الدوريّ لأنه كان قادراً على الوصول إلى معلوماتٍ عن نسبةٍ عاليةٍ من جميع العناصر. وبالمثل، نحن بحاجةٍ إلى دخول حديقة حيواناتٍ للجسيمات لنرى ما الذي يوجد داخلها. كان دوبيرينر عاجزاً عن إحراز تقدّم يتجاوز ثلاثياتِهِ، والقدرَ القليلَ من المعطيات (البيانات) التي كانت في حوزته؛ أما نحن فسننجز تقدماً يتجاوز التّدويمَ النظيريَّ بعد أن نكون قد حصلنا على قدرٍ كافٍ من المعطيات، وذلك لعرض نموذج أكثر اتساعاً.

●

إن ما يقوم به علماء فيزياء الجسيمات، في سعيهم لدفع الحضارة إلى الأمام،

هو أخذ قطعةٍ من مادّةٍ، وقذفُها بعنفٍ نحو أخرى، ثم البحث بفضولٍ في الأجزاءِ المحطَّمةِ التي تنتج عن التصادم. وكما قد تتوقَّعُ، فكلما زادت قوّةُ الصدمةِ، صَغُرَتِ الشظايَا؛ ومسرِّعاتُ الجسيماتِ المستعملَةُ لتحطيم جسيمٍ إلى جسيمٍ هي تحقيقٌ لأحلامِ قدماءِ اليونانيين، وهي تمنحنا الأمَلَ بمواصلةِ التحطيمِ إلى نقطةٍ تتوقّف عندها هذه العملية.

علينا الآن أن نكون مستعدين لمواجهة مشكلةٍ. ما يجري تشظيتُهُ من المادة يعتمد على قوّة الصدمة. قد لا نكون واثقين تماماً بأننا بلغنا نهاية التشظية، لأن تنفيذ مزيدٍ منها يمكن أن يحدث نتيجة بناء مسرِّعٍ أكبر (وفي هذا العمل، يكون الحجم مهمًّا حقًّا. لأن القوة تتزايد مع الكبر). وفي الحقيقة، فعندما نقترب من نهاية الفصل، سنرى أنه يتعيّن علينا، إذا أردنا اختبار فهْمنا للعالَمِ التّحتيِّ كلِّه، بناءُ مسرِّعٍ يستغرق الكونَ، ويستهلك من الإنفاق والموارد مقداراً يتجاوز مُخْرَجَاتِ الاقتصاداتِ في كلِّ مكانٍ.

وإذا أبقينا هذه الفكرة في ذهننا، فقد تكونُ في المرحلة التي بلغها دالتون قبل قرنين من الزمان عندما ادّعى أنّ قدْراً كافياً من الطاقة ـ طاقة كيميائية ضعيفة ـ يوصلُنا إلى الذرّات، وكان قادراً على صوغ نظريات تستند إلى شخصيات تلك الذرات بقطع النظر عن تشكيلاتها الداخلية. العِلْمُ، مثلُهُ مَثَلُ متسلِّقي قمة إڤرِسْتْ، قانع بالتوقُّف مدةً من الوقت في مراحل مختلفة خلال رحلته نزولاً إلى الأعماق، ولا يَسعى للإسراع في دخوله إلى الأغوار السحيقة للمجهول. كانت الذراتُ أساسيةً لعلماء العصر الفكتوريّ، وجسيماتنا الأولية سنعتبرها أساسية لنا أيضاً. وبعبارة أخرى لنقبل الآن (وليس في آخر الفصل) أن حديقة الحيوانات الحالية للجسيمات هي الحديقة الحقيقية، أو أنها، على الأقل، حديقة حيواناتٍ أساسيةٌ إلى حد ما، ولنقابل الحيواناتِ التي اصطادها الصياديون منذ أن عُرِفَتْ مركّباتُ الذرات عام 1897، واستسلمت النّوى للهجوم الذي شُنَّ عليها عام 1919.

عندما نفكر في الجسيمات، فنحن نفكر في مكوّناتها وفي القوى التي

تجعل تلك الأجزاء يتماسك بعضها ببعض، أي في الغراء. وقد توصّل العلماء إلى قوة مسؤولة عن كلّ هذه التفاعلات. الحقيقة أن في هذا شيئاً من المبالغة، وكي نكونَ أكثر دقة، يعتقد العلماء أن ثمة قوةً واحدة تؤثر في الكون، وهي اقتصادية، لكنّ هذه القوة تُظْهِرُ نفسها بخمس طرائقَ مختلفةٍ؛ ثلاثٌ من هذه القوى - وهي الكهربائية، والمغناطيسية، والتثاقلية - مألوفة لنا لأنها تَرِدُ في حياتنا اليومية. أما القوتان الباقيتان - الضعيفة والشديدة - فغير مألوفتين إطلاقاً.

كان أحدُ أعظم الإنجازات العلمية في القرن التاسع عشر برهان العالم الأسكتلندي جيمس كلارك ماكسويل J.C Maxwell (1831-1879)[7] - الذي نشره في مؤلَّفه بعنوان نظرية دينامية للحقل الكهربائي A dynamical theory of electrical field (1864) - الذي بيّن فيه أن أفضلَ طريقةٍ للتفكير في القوتين الكهربائية والمغناطيسية هي أنهما وجهان لقوة كهرمغناطيسية واحدة. وقد بنى ماكسويل أعمالَهُ النظريةَ على النتائج التي حصل عليها مايكل فارادي M. Faraday (1791-1867) - الذي كان حاذقاً تجريبيًّا، لكنه عاجزٌ عن التعبير عن نتائجه رياضياً، وقد سبق لفارادي أن قدّم مفهوم الحقل field في الفيزياء بوصفه مجالَ تأثير قوةٍ. وعموماً، تعمل القوة الكهربائية بين جميع الجسيمات المشحونة، في حين تعمل القوة المغناطيسية بين الجسيمات المشحونة المتحركة، كتيارات الإلكترونات في لفَّاتٍ مجاورة من الأسلاك. إحدى الثمار الرائعة لهذا التوحيد بين قوتين كانتا متباينتين سابقاً هي إيضاح ماكسويل للطبيعة المحيِّرة حتى ذلك الوقت لطبيعة الضوء، وإثبات أنه إشعاع كهرمغناطيسي. وقد أكد هذا عام 1888 هنريش هرتز H. Hertz (1857-1894) الذي اكتشف الأمواج الراديوية، وكانت النتيجة هي الاتصالات الحديثة. وثمة ثمرة فكريّة أخرى هي نظرية النسبية، التي برزت عندما عُرِضَتْ معادلات ماكسويل على آينشتاين (الفصل 9).

وهناك ثمرة ثالثة سقطت من نفس الشجرة في أوائل القرن العشرين مُذْ

(7) هناك معلومة تقول إن والد ماكسويل جون كان اسمه Clerk فقط، لكنه أضاف اسم ماكسويل عندما ورث عقاراً من أحد أسلافه الذي ينتمي إلى عائلة ماكسويل.

قُدِّمَ مفهومُ الفوتون ـ وهو رزمة صغيرة من الطاقة الكهرومغناطيسية ـ من قِبَلِ آينشتاين عام 1905 (انظر الفصل 7)، وسمّاه الكيميائي الأمريكي ج. لويس G.N.Lewis عام 1916، كان الفوتون أول الجسيماتِ المِرْسَالَةِ messenger particles التي جرى تعرّفها، وهي جسيماتٌ تنقل قوةً بين الجسيم المُصْدِرِ والجسيم المستقبِلِ، مثلما يحدث بين إلكترونين أو إلكترون ونواة. الفوتون هو الجسيمُ المرسالُ للحقل الكهرمغناطيسي، الذي ينقل القوة بين الجسيمات المتفاعلة، ويرتحل بسرعة الضوء.

نحن بحاجةٍ إلى ملاحظة خاصتيْن للفوتونات في هذه المرحلة، بسبب ارتباطهما بما سنتطرق إليه لاحقاً. الفوتون عديم الكتلة، وله، مثل الإلكترون، تدويمٌ لا يمكن إيقافه البتة. ولأسباب تقنية ترتبط بالوصف الميكانيكي الكموميّ للتدويم، فَيُنْسَبُ إلى الفوتون وحدةٌ من التدويم، أما الجسيمات، (التي تحتوي بروتوناتٍ ونيوترونات، وإلكتروناتٍ أيضاً) فتسمّى فِرْمِيُونَاتٍ fermions، نسبةً إلى الفيزيائي الإيطالي إنريكو فيرمي (1901-1954) E. Fermmi الذي اكتشف طريقةَ وصفِ مجموعةٍ منها، والذي أشرف أيضاً على بناء أوّل مفاعِلٍ نوويٍّ خلال الحرب العالمية الثانية ضمن مشروع مانهاتان الحربي. هذا وإن الجسيمات التي لها تدويم صحيح integral spin تسمى بوزونات bosons نسبةً إلى الفيزيائي الهندي ساتيندرا ناث بوز S.N. Bose (1894-1974) الذي درس الخاصّيّات الإحصائية للنظم المكوّنة من أعدادٍ كبيرةٍ منها، مثل صندوقٍ مليءٍ بالضوءِ، أو شعاعٍ شمسيٍّ. وسيتبيّن أن جميع الجسيمات الأساسيّة للمادة هي فرميونات، في حين أن جميع الجسيماتِ المرسالةِ هي بوزونات. لذا فإن الوصف الدقيقَ جدًّا للمادّة هو قولنا بأنها مجموعة من الفرميوناتِ متماسكةٌ مع بوزوناتٍ.

وعلى كلِّ محب للنجوم أن يكون قادراً على إخبارك أن الفوتون عديم الكتلة، لأن قدرتنا على رؤية النجوم هي نتيجة مباشرة لعدم وجود كتلة له. وسلسلة الحجج التي يمكن تقديمها هي كما يلي: أولاً، سبق ورأينا في نهاية الفصل 3 أنه يرتبط بالجسيمات، التي تعيش مدداً قصيرةً جدًّا، ارتداداتٌ شديدةٌ في طاقتها. ثانياً، كي يأتي جسيمٌ مرسالٌ ذو كتلةٍ معطاةٍ إلى الوجود، يجب عليه

أن يقترض طاقةً تتناسب طردياً مع كتلته ($E = mc^2$): فالجسيمات الثقيلة تقابل وجود قدر كبير من الطاقة. ولا يمكن لجسيم أن يأتي إلى الوجود دون أن يقبض عليه شرطيُّ انحفاظِ الطّاقة إلاّ إذا عاش وقتاً قصيراً جدًّا يمكن فيه إخفاء السرقة بواسطة الارتياب في أيّ تدقيق في الطاقة. يترتب على ذلك أنه لا يمكن لأي جسيم ثقيل أن يأتي إلى الوجود دون أن يقبض عيه شرطيٌّ انحفاظ الطاقة إلاّ إذا عاش مدة قصيرة جدًّا (يمكن أن تسرق بليون دولار دون أن تتعرض لعواقب وخيمة، خلال بيكوثانية). الحلقة الثالثة من سلسلة الحجج هي أنه خلال الوقت الذي يوجد فيه الجسيم، يطير الجسيمُ المراسلُ بسرعةٍ عاليةٍ، والمسافة التي يمكنه قطعها تتناسب طرديًّا مع طول المدّة التي يُسمح له أن يحياها[8].

إن جسيماً مرسالاً ثقيلاً ومدة حياته قصيرة جدًّا، لا يستطيع قطع مسافةٍ طويلة، وبالعكس، فلكي يقطع جسيمٌ مرسالٌ مسافاتٍ غيرَ محدودةٍ، عليه أن يحيا إلى الأبد، وهذا شيء يمكن أن يفعله دون أن يجري القبض عليه من قِبَل شرطيّ انحفاظ الطاقة، وذلك في تلك الحالة فقط التي لا يسرف فيها أي شيء في المقام الأول، أي أنه يجب أن يكون عديم الكتلة. ولو كان للفوتونات كتلةٌ فإنّ الإشعاعَ الكهرمغناطيسيَّ لن يتمكّنَ من قطعِ مسافاتٍ طويلةٍ، وعندئذٍ لن نرى النجوم، ولن يتمتع بمنظرها عشّاقُها. ولو كانت الفوتون ثقيلة حقاً، لتشتّتت الذرات، لأن سَحْبَ النواةِ لن يقدر على التشبّث بالإلكترونات[9].

القوة المألوفة الثالثة هي الثقالة. تعمل الثقالة بين جميع الجسيمات، لكنها أضعف كثيراً من التفاعل الكهرمغناطيسي. فمثلاً، التفاعل التثاقلي بين إلكترونيْن أضعف 10^{42} مرّة من تفاعلهما الكهرمغناطيسي. وإذا كان بإمكان قوة تثاقلية تحريك نبابةٍ وزنها مليغرام واحد، فإن القوة الكهرمغناطيسية قادرة على تحريك

(8) يرتبط مدى قوةٍ بكتلة جسيمها. المرسال بالقانون:
الطاقة = ثابت بلانك/ (الكتلة × سرعة الضوء).
وإذا كان الفوتون بثقل إلكترون، فيمكن للضوء الانتقال مسافة 10^{-13} متر عن منبعه.

(9) بغية الدقة، أنا بحاجةٍ إلى القول إن هذه الحجج تتطبق فقط على ما يسمى الجسيمات الافتراضية، وهي الجسيمات التي تنقل القوة؛ ويمكن للجسيمات الحقيقية أياً كانت كتلها أن تقطع مسافات طويلة وتنقل معلوماتٍ.

مليون شمس. إن كوننا غيرَ مُهَيْمَنينَ علينا بالكهرمغناطيسية، وقادرين على تحمل الثقالة، يعود إلى أن العالَمَ مكوّن من أعدادٍ متساويةٍ من الجسيمات المشحونةِ إيجاباً وسلباً، لذا فإن التجاذبات والتنافرات يُفْنِي بعضُها بعضاً بالمقياسِ الكونيّ. بيد أنّ التثاقل تراكميٌّ تماماً: هناك جذب تثاقليٌّ واحد، ولا يوجد تنافر، لذا لا وجود للإفناء هنا. فكل جسيمات الكون تتعاون معاً تعاوناً ضعيفاً، ونحن نتعرض لقوةِ سحبِهَا الجماعيّ. أما القوى الكهرمغناطيسية، فهي ذات مكانة عليا محليًّا: فهيئتُكَ نتيجةٌ، إلى حد بعيد، للقوى الكهرمغناطيسية، وحقيقة كونك لم تتخذ هيئةَ بركة صغيرة على الأرض، تعود إلى القوة الهائلة للكهرمغناطيسية مقارنة بالتثاقل.

ثمة فكرةٌ ليكون جسيمٌ جسيمَ مرسالٍ للتثاقل، فعلى الأقل، سُمِّي غرافيتون graviton ـ لكنْ لم يُكتَشف حتى الآن بسبب تفاعله الضعيف جدّاً مع المادة. الغرافيتون هو بوزونٌ عديم الكتلة، مثل الفتون، لكنه يدوّم بضعف السرعة. إنْ تسحبَ تلك الثقالةُ فضاءً غيرَ منتهٍ تقريباً علامةٌ على أن الغرافيتون عدم الكتلة. ولا بدّ لكلّ بحّارٍ حاذق أن يكون قادراً على إخباركَ أن تدويم الغرافيتون 2، لأن ثمة ثلاثية من الحجج الدامغة التي تربط هذا المعدّل المضاعف للتدويم بحقيقة وجود حادثتي مد وجزر يومياً في محيطاتنا.

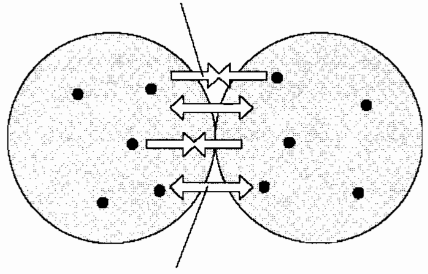
سنتطرّق الآن إلى القوتين غير المألوفتين، القوة الشديدة strong force، والقوة الضعيفة weak force. أما كونهما غير مألوفتين، فقد يكون صحيحاً، لكن الشخص الذي يفكّر يجب أن يكون قادراً على استنتاج وجودِ قوةٍ شديدةٍ، الحجة في ذلك هي: تتكوّن النواة من بروتونات ونيوترونات محزومةٍ معاً في حجمٍ جدٍّ صغيرٍ. القوة الكهرمغناطيسية تنافريّةٌ بين البروتونات (لأن لها نفس الشحنة، ولأن الشحنات المتماثلة تتنافر)، لذا ثمة ميل قوي للنواة إلى أن تنفجر. (بعضها ـ مثل نوى العناصر المشعة ـ يتفجر؛ للسبب الذي ذكرناه بالضبط). تُرى ما الذي يجعل البروتونات في النوى متماسكةً؟ أكثر من ذلك، لماذا لا تبتعد النيوترونات العديمة الشحنة عن النواة؟ ما الذي يُبقيها في مكانها؟ لا تتأثر النيوترونات بأي قوة كهربائية، لذا فلا بدّ أن يجذبها شيء آخر. وخلاصة القول، لما كان معظم النّوى لا تنفجر، وكان معظمها يظل متماسكاً مع النيوترونات،

فلا بد من وجود قوة أشد من القوة الكهرمغناطيسية تعمل بين البروتونات، وبين النيوترونات، وبين البروتونات والنيوترونات. أضف إلى ذلك أنه لما كانت المادة كلها في الكون لم يجر حشرها في نواة ضخمة واحدة، فإنه يجب أن يكون لهذه القوة الجاذبة القوية مدًى جدُّ قصير - لا يزيد على قطر نواةٍ تقريباً.

عَلَيَّ هنا أن أتطلب بعض الحذر. النيوترونات والبروتونات جسيمات مركبةٌ مكوّنة من الكواركات quarks (انظر في الأسفل)[10]. وما يجب علينا النظر فيه حقاً ليس التفاعل الصرف بين النكليونات - الحصيلة الإجمالية للتجاذبات بين بعض المركّبات، والتنافراتِ بين أخرى - بل التفاعل المفصّل بقدر أكبر بين مركّباتها الفردية، إذ قد يوجد هناك فرق كبير. فمثلاً، عندما أعانقك بقوة، فإن القوة الكهرمغناطيسية الصافية التي تعمل بيننا هي صفرية عملياً، مع أن نوى ذراتنا تتنافر بقوة، وإلكتروناتنا تتنافر أيضاً بقوة: إن هذه التنافرات الشديدة تُلغَى بفعل التجاذبات القوية بين إلكتروناتك ونواي وإلكتروناتي ونواك (الشكل 9.6)[11]. وهكذا فإذا فكرنا في نفسينا أننا جسيمان مركّبان، فإن حقيقة امتلاكنا لتفاعلٍ كهرمغناطيسي صفريٍّ يخفي حقيقة أن لمركّباتنا تفاعلاً قوياً جداً وطويل المدى. وبالمثل، فإن التفاعل الصافي بين النكليونات، وهي جسيماتٌ مركّبةٌ، قد يكون مختلفاً جدًّا عن القوة التي تعمل بين مكوّناتها من الكواركات. وفي الحقيقة، فهذا هو الحال. وللقوةِ المتبقيّةِ residual بين النكليونات مدًى قصيرٌ جدًّا، وهو قطر نواةٍ. لكنْ للقوةِ بين الكواركات المنفردة، وهي القوة الشديدة الحقيقية، مدًى غيرُ نهائيٍّ، وجسيماتها المرسالة هي بوزوناتٌ عديمة الكتلة تسمى غليونات gluons. وخلافاً للقوى المألوفة، فإن القوة الشديدة الحقيقية تتعاظم مع تزايد الانفصال بين الكواركات. وسنتفحَّصُ الغليوناتِ و«الشحناتِ القويّةَ» لهذا العالَمِ المضطرب بدقةٍ أعلى في وقتٍ لاحق.

(10) موري كلمان M.Gell-Man، الذي نسب هذه التسمية إلى ابتكاره (عام 1961)، كان يلفظها كْوُرْكْ kwork، ربما لأنه لم يَرَ الكلمة في سياقها في الجملة (Three quarks for Muster Mark) التي وردت في Finnegans Wake. ولديّ انطباع أن معظم الناس يلفظون الآن quark لتتساجع مع Mark.

(11) ثمة تقدير غير دقيق للتنافر بين إلكتروناتنا في مثل هذا العناق، وهو $4X10^{27}$ نيوتن، وهذه قوة إن طبقناها على الأرض في مدارها حول الشمس، فإنها توصل الأرض إلى التوقف عن الدوران في أقل من 10 ثوانٍ. العناقات الحقيقية هي أفعال متوازنة جدًّا.



الشكل 6-9. لنبين هنا إيضاحاً للتوازن الدقيق بدرجة استثنائية بين جسمين معتدلين كهربائياً مكوّنيْن من إلكترونات (الخلفية الرمادية) ونوىً (النقاط السود). إن القوة التنافرية بين الإلكترونات في مثل هاتين الكرتين من الماء (اللتين تمثلان جسمي شخصين متعانقين بشدة) تساوي تريليوناتٍ كثيرةً من النيوتنات (النيوتن N هو وحدة للقوة؛ ويعادل النيوتن القوة التثاقلية التي تخضع لها تفاحة على شجرة وزنها 100 غرام). القوة التنافرية بين النّوى هي نفس هذه القوة. لكن التجاذب بين الإلكترونات في جسم والنوى في الجسم الآخر تساوي أيضاً تريليونات كثيرة من النيوتنات، ولحسن الحظ، فإن التجاذبات والتنافرات تُلغَى تماماً. هذا يعني عدم وجود تجاذب أو تنافر بيننا.

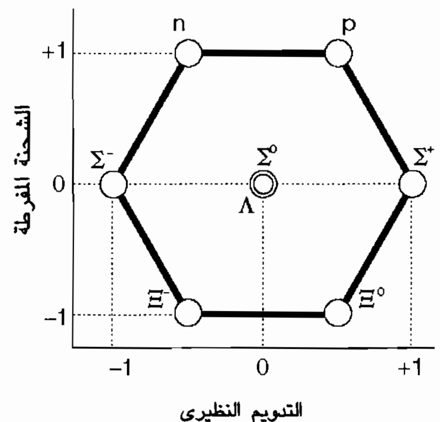
لا أتوقّعُ منك استنتاجَ وجودِ القوة الضعيفة أو أيٍّ من خاصّياتها. وقد اقتُرِحَتِ القوةُ الضعيفةُ لتفسير أنواعٍ معينةٍ من الاضمحلال (التفكك) الإشعاعي. ومع أنّ أفضلَ ما نفعله هو التفكيرُ بدلالةِ الكواركات، فإن النتيجة الصافية للقوة يمكن تصورها تأثيراً يحرف نيوتروناً وينتزع إلكتروناً، مخلّفاً وراءه بروتوناً. يُلْفَظُ الإلكترون من النواة، وينشى شكل النشاط الإشعاعي المسمى الإشعاع (بيتا). وللقوة الضعيفة مدى قصير جدًّا، أقل من قطر نواةٍ. ويتوسطها جسيماتٌ تُسمَّى بوزوناتٍ متجهةً W وَZ W and Z vector bosons كتلها أكبر من كتلة البروتون 80 مرّة و90 مرّة على التوالي.

وعموماً، تسمى الجسيمات المرسالة الجسيماتِ العياريَّةَ gauge particles. وسيغدو أصل هذا الاسم الغريب واضحاً بعد قليل. ويكفينا الآن القول إن الفوتون، والثقالة، والبوزونات المتجهة، والكليونات هي أيضاً جسيمات عيارية، وهذه أول إشارة إلى أن للقوى الأساسيةِ أصلاً مشتركاً. وفي الحقيقة، فإن توحيد القوى، الذي بدأه ماكسويل، هو دمجُ القوتيْن الضعيفة والكهرمغناطيسيةِ

معاً في قوةٍ وحيدة تسمى القوة الكهرضعيفة electroweak interaction. هذا التوحيد هو سمة للتناظر، وسنعود إليه حال انتهائنا من تفحص حديقة حيوانات الجسيمات عن كثب.

●

هذه الحديقة مقسمة إلى قسمين كبيرين، في القسم الأول تطوف «الهدرونات» hadrons، وفي الثاني «اللبتونات» leptons. الهدرونات جسيماتٌ تتفاعل بواسطة القوة الضعيفة. وفي قسم الهدرونات لن ننظر إلاّ في الكواركات نفسها، لأن كلّ المخلوقات العجيبة التي تجول هناك (البروتونات، والنيوترونات، وكثير من الأشياء الغريبة والشاذة) مبنيّةٌ من هذه الكواركات باستعمال قوانين تستند إلى نوع خاص من التناظر. ربما سمعتَ بالطريقِ الثُّمانيِّ eight-fold way (الشكل 6-10). هذا الطريق هو نوع من الجدول الدوريّ للهدرونات يجري فيه تصنيفها باستعمال هذه الزمرة الخاصّة من عمليّات التناظر. ولما كان البروتون والنيوترون في عائلة واحدةٍ، فيمكننا أن نفكّر في أن قرابة تدويمهما النظيري isospin شبيهة بقرابة جسيمٍ لثلاثية دوبيرينر (في هذه الحالة ثنائية لا ثلاثية)، وهذا



الشكل 10-6 - الطريق الثُّمانِيُّ هو طريقة لتصنيف وتنسيق الجسيمات الأوّليّة، وهذا يشبه الجدول الدوري للعناصر الكيميائية. نرى هنا رسماً لثمانية جسيمات (من المحتمل أن يكون البروتون p، والنيوترون n، دون غيرهما، مألوفين، لكن الجسيمات الأخرى تجمعها قرابات غريبة أحد محاوره تدويم نظيري (نوقش في النص)، والمحور الآخر هو شكل آخر لتناظر داخلي يسمى شحنةً مفرطَة hypercharge. بهذه الطريقة، أمكن تبيان أن ثمانية جسيمات يرتبط بعضها ببعض. وثمة مخططات أكثر تعقيداً تتناول الجسيمات الأخرى.

نمطٌ من نموذج التصنيف الإجمالي. واللبتونات هي بقية الجسيمات: إنها جسيمات لا تتفاعل بواسطة القوة الشديدة.

وثمة ما يثير الفضول، وهو شيء يحتاج إلى تفسير، ونعني به وجود ثلاث عائلات من الهدرونات وثلاث عائلات من اللبتونات (الشكل 6-11). وكما هو الحال في العائلات النموذجية في الحياة الحقيقية، فإن كلاً من العائلات الثلاث من الجسيمات مؤلف من زمرتين من الجسيمات التي تنتمي إلى جيلين.

	العائلة الأولى		العائلة الثانية		العائلة الثالثة	
	جسيم	كتلة	جسيم	كتلة	جسيم	كتلة
لبتونات	إلكترون	0.000054	ميون	0.11	تاوون	1.9
	إلكترون - نيوترينو	$<10^{-8}$	ميون - نيوترينو	<0.0003	تاوون - نيوترينو	<0.033
هدرونات	فوق	0.0047	فتنة	1.6	الذروة	189
	تحت	0.0074	غريب	0.16	القعر	5.2

الشكل 6-11. جدول يحتوي العائلات الثلاث للجسيمات الأساسية، وهو يبين جيلي اللبتونات والهدرونات (الكواركات) في كل حالة، الكتل هي مضاعفات لكتلة البروتون.

لنأخذ اللبتونات أولاً. يوجد في إحدى العائلات إلكترون وإلكترون - نيوترينو، وفي عائلةٍ ثانيةٍ ميون ونيوترينو، وأخيراً، يوجد الجسيم تاو tau (أو أتاوُونْ tauon) في العائلة الثالثة. للنيوترينوهات كتلة صغيرة جداً - أقل كثيراً من كتلة الإلكترون - وربما كانت صفرية الكتلة؛ ولا يمكن أن يدّعي أحدٌ معرفة الحقيقة بهذا الشأن. يجب أن يكون لها خاصية أخرى للتمييز بين هذه الأنماط الثلاثة، وثمة كلمة جيدة تعبّر عن هذه الخاصية هي النكهة flavour. لذا فإن النيوترينوهات هي نكهات مُدَوَّمَةٌ عديمة الكتلة تقريباً. الميون شبيه بإلكترون ثقيل باعتدال، له نفس الشحنة والتدويم spin، لكنه أثقل بنحو 204 مرات، وهذه النسبة 204 هي النسبة بين ثقلي كرة البولينغ وكرة الطاولة.

هناك أيضاً الجسيمات المضادة antiparticles ـ ويحظى الجسيم المضاد ـ جسيمُ مادةٍ مضادةٍ ـ باهتمام خاص من قبل كتّاب الخيال العلميّ، لأنه يبدو غريباً وعجيباً. الحقيقة أنه ليس كذلك، إنما هو نادر الوجود إلى حدٍّ ما. للجسيم المضاد نفس خاصيات الجسيم الموافق له، لكنّ له إشارةً معاكسةً للشحنة، فمثلاً، الجسيم المضادّ لإلكترونٍ هو البوزترون positron المشحون إيجاباً، والذي له نفس الكتلة والتدويم اللذين يتّصف بهما الإلكترون نفسه. وأحد الأسئلة التي يتعيّن علينا النظر فيه هو: ما السبب في وجود قدر قليل جدًّا من المادة المضادة حولنا، وفي كوْن العالَمِ لاتناظريًّا في المادة والمادة المضادة؟

وكما نرى في الشكل (6-11)، فإن الكواركات الستة التي تكوّن الهدرونات تتوزّع على ثلاث عائلات، لكلٍّ منها جيلان. وفيما يتعلق باللبتونات، يمكننا تمييز العائلات بواسطة كتلها. فالنظيران الكواركيّان للإلكترون ونيوترينه neutrino هما الكوارك الصاعد up quark والكوارك الهابط down quark، اللذان وزناهما يعادلان وزني 8.7 و 13.7 إلكترون، على التوالي. النظير الكواركيّ للميون ونيوترينه هما الكواركُ الجميلُ charm quark والكوارك الغريب strange quark، اللذان وزناهما يعادلان وزني 3000 وَ300 إلكترون، على التوالي. ونظيرا التاوون ونيوترينه هما كوارك الذروة top quark (الذي اكتُشف عام 1995) وكوارك القعر bottom quark اللذان لهما وزنان ضخمان يعادلان وزني 350 وَ10 آلاف إلكترون على التوالي. ويقال إن لهذه التشكيلاتِ المختلفةِ للكواركات ـ الصاعدة والهابطة والغريبة، وغيرها ـ نكهاتٍ مختلفةً، وقد قيل هذا عن النيوترينوهات المختلفة أيضاً. ومعظم مادتنا المألوفة (وتحديداً بروتونات ونيوترونات النوى والإلكترونات المحيطة بها في الذرات) مؤلّفةٌ من العائلة الأولى من اللبتونات والكواركات (الإلكترون، نيوترينه، الكواركات الصاعدة والهابطة)، ولا تُسهم العائلاتُ الأخرى إلاّ في توفير مزيدٍ من الأشكال الغريبة للمادة. وبصراحةٍ تامّةٍ، يبدو أن وجود العائلتين الثانية والثالثة نوعٌ من الهدر؛ لكنْ لا شك في أن لهذا سبباً، لأن ثمة سبباً لكلّ شيء. فهل يعود السبب إلى التناظر؟ سنرى أنّه من المحتمل أن يكون الجواب هو نعم.

لم يجر حتى الآن اكتشاف أيٍّ من الكواركات وحده. وهذا يقودني إلى تقديم ملاحظةٍ لِتُهَيِّيءَ عقلك لاستيعاب هجرة أخرى لنموذج علميٍّ سيحدث مع اقترابنا من نهاية الفصل، فقد أخفق اليونانيون في معظم الأحوال أن يكونوا علماء لأنهم تحاشوا، التجريب، أو أنهم لم يبتكروه: كان كلّ ما لديهم نظرياتٌ دون أن تدعمها أو تختبرها التجربة. لم يجر تعرّف الكواركات مباشرة، لكنْ يُعتقدُ بأنها موجودة، وذلك يعود إلى أنها مطلوبة من قبل نظريةٍ ناجحةٍ حالياً، ثم إن وجودها مؤيَّد بدعمٍ تجريبيٍّ ثانويٍّ secondary، وقد يكون في هذا خطوةٌ إلى الوراء باتجاه اليونانيين، وهذا يخلّف دون شك عودةً إلى الوضعية positivis. النظرية هنا ذكية، وليست هدّامة، لأنها تتنبأ حتى بأن الكواركات المنعزلة لن يُعثَر عليها، لأن القوة الشديدة بين الكواركات، كما سبق ورأينا، تتعاظم مع ازدياد المسافة، ومن ثَمَّ فلن تتمكن البتة من الإفلات من الاتحاد بعضها ببعض. وهكذا فإن عدم العثور عليها جزء من البرهان على وجودها! فهل يتعيّن علينا الاعتقاد بوجود الكواركات، أو رفضها كما جرى للذرّات عندما رفضت مرّةً باعتبارها رموزاً حساباتية؟ إنها تفسّرُ الكثيرَ، وهذا يتضمن نتائجَ تجريبيةً لوجودها، لذا فقد يتعين علينا الإيمان بوجودها. وإذا كنت مقتنعاً بهذا النمط من الإيمان، بهذا النمط من الحقيقة، فربما تجد أن من الممكن قبول ما سنورده في وقت لاحق.

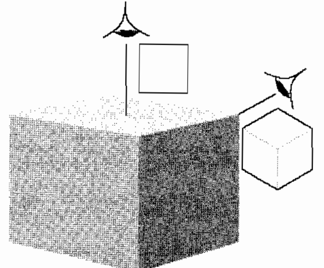
وهكذا فكل ما يهمنا هو أن ثمة ثلاث عائلات من الفرميونات لها خاصيات متشابهة بمعزلٍ عن تدويماتها وقدراتها المتباينة على المشاركة في قوى مختلفة، وبخاصة القوة الشديدة. وكل شيء هناك، بقدر ما نعلم، مكوّنٌ من هذه المركّبات المرتبط بعضها ببعض بواسطة أربعة أنماط من البوزونات العياريّة. إن العالَمَ، في جوهره، بسيطٌ جدًّا.

●

لكن وصفنا ليس بسيطاً بما فيه الكفاية. ومع أن الجسيمات صغيرة جدًّا، فإن عددها ـ أربعة فرميونات (إذا ركّزنا على العائلة الأولى)، وبضعة بوزونات عيارية ـ ما يزال هائلاً إذا كنا نبحث عن البساطة الحقيقية. لقد سبق وأشرنا إلى أن

البوزونات W وَZ الخاصة بالقوة الضعيفة، وفوتونات القوة الكهرمغناطيسية هي وجوهٌ مختلفة للجسيمات المِرْسَالة للقوى الكهرضعيفة. وهل يمكن أن تكون جميع الفرميونات وجوهاً مختلفةً لشيءٍ واحدٍ فقط؟ وهل تكون البوزونات كذلك؟ وهل يمكن، في الأصل، أن تكون جميع الفرميونات والبوزونات التي تربطُ بعضَها ببعض هي مجرد وجوه مختلفة لشيءٍ وحيد؟ إن صحّ هذا الأمر، فهو شيءٌ قريبٌ من البساطة الكاملة.

يبدو لنا وكأن هذا هو الحال. بيد أنه إذا أردنا فهم ماذا يعنيه هذا الأمر، فيجب علينا العودة إلى عنوان هذا الفصل، التناظر، ونرى كيف يمكن أن يُوفر التناظرُ إطاراً لفهمٍ عميقٍ لما يبدو أننا نتقدم نحوه شيئاً فشيئاً. ولرسمِ صورةٍ دقيقةٍ للطريقة التي يتمكّن بها التناظرُ من إيجاد علاقاتٍ بين أشياءَ يبدو أنْ لا علاقة بينها، فقد تحبُّ أن تُبقي في ذاكرتكَ مكعّباً. من الأعلى، إنه مربّع. ومن فوق أحد رؤوسه (بإغماض إحدى العينيْن) يبدو مسدّساً (الشكل 6-12). وتدويرُ مكعّبٍ يحوّل المربَع إلى مسدّسٍ. والحقيقة أنّ هذا تحويل غريب جدًّا لمشاهدٍ ثنائيّ البعد، لكن الأمر بسيط لأننا قادرون على الوصول إلى بعد ثالث. ومما يساعدنا هو تذكُّر ذلك حين نتحدّث عن عملياتِ التناظرِ التي تربطُ بينَ أشياءَ يبدو ظاهريًّا أنْ لا رابطةَ بينها.



الشكل 6-12. احتفظْ في ذاكرتكَ بهذا التشبيه في بقية الفصل: إنه يبيّن أنّ شكليْن ثنائيّي البعدِ غير مرتبطٍ أحدُهما بالآخر ظاهريًّا (مربّع ومسدّس) يمكن أن نفكر فيهما بأنهما منظران مختلفان لجسمٍ واحدٍ في فضاء ثلاثي الأبعاد، هو المكعب.

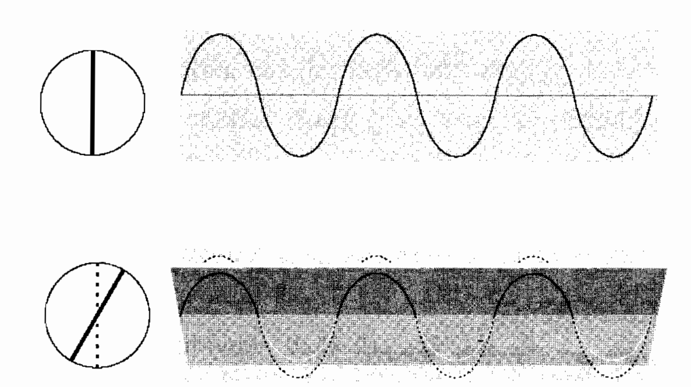
ثمة سمةٌ مميّزةٌ لافتة للنظر في الطبيعة تُسمّى التناظرَ العياريَّ gauge symmetry وقد اعتُمِدَتْ هذه التسميةُ الكئيبةُ والمزعجةُ وغيرُ المعبِّرة لأسبابٍ تاريخيةٍ، وذلك قبل أن يُصبح لفيزياءِ الجسيماتِ معنويات عالية خلال الستينيات من القرن العشرين، واعتمادها أسماءَ مثل الغرابة strangeness والجمال char،

وذلك قبل وقت طويل من اعتماد تسمياتٍ أخرى مثل «البوزون المتجه المتوسط» interediate vector boson. التناظر العياري هو واحد من التناظرات الداخلية المجردة، سبق لي أن ذكرتُ أنك ستقابلها. ومع ذلك فهذا التناظر قويٌّ حين يَجْري تفسيرُهُ بحكمةٍ، لأنه تناظرٌ يكشف النقابَ عن أصل القوة.

لفهم التناظر العياريّ، علينا العودةَ إلى معادلة شرودينغر لإلكترونٍ وإلى حلِّها، الدالّة الموجيّة wavefuction. للدالة الموجيّة خاصية، هي طورها phase، الذي يمكن تعديله دون أن يكون لذلك أي أثر فيزيائي قابل للكشف. وينشأ هذا التناظر من النقطة التي ذكرناها سابقاً، وهي أنّ مربع قيمة الدّالّة الموجيّة في أيّ نقطة هو الوحيد الذي له أهمية فيزيائية، لذا يمكننا تعديلُ الدّالةِ الموجيّةِ نفسِهَا شريطة أن يبقَى مربَّعُها نفسَهُ. وسيكونُ من المناسب إيضاحُ التغيّر في طور الدّالّة الموجيّة لجسيمٍ طليقٍ بواسطة دورانٍ للموجة حول اتجاهِ سيرها (الشكل 13-6)[12]. إن تعديلَ الطّوْر بهذه الطريقة مثالٌ على تحويلٍ عياريٍّ gauge transformation. وهذه إحدى عمليات التناظر الدّاخلي التي ذَكَرْتُ، ذلك أنّكَ لو أغمضتَ عينيكَ خلال انشغالي بتعديل الطّور، لما عرفْتَ من القياسات الفيزيائية (التي تعتمد على مربع الدّالة الموجيّة، لا على الدالة الموجيّة نفسِها) ما إذا كنتُ فعلتُ شيئاً أم لا. وإذا غيّرنا طور دالّةٍ موجيّةٍ بكميةٍ ثابتةٍ في كلّ مكانٍ، فإنّ معادلةَ شرودينكر نفسَهَا تبقَى على حالها دون تغيير، لأن جميع الموجات التي لها أطوارٌ مُنْزَاحَةٌ هي حلولٌ أيضاً. وبعبارة أخرى، إن التحويلَ العياريّ بواسطة مقدارٍ ثابتٍ هو تناظر لمعادلة شرودينغر، نُسمّي هذه الزمرةَ من العمليات التناظرية ـ تغيير الطّور بواسطة أيّ شيء يقع بين 0 و 360 . U(1)، حيث يشير الرقم 1 أن ثمة خاصيةً واحدةً فقط طرأ عليها تغيُّرٌ[13]. إن عبارة «الزمرة التناظرية U(10» ليست سوى طريقة لطيفةٍ للإشارة إلى قدرتنا على تعديلٍ وسيطٍ واحدٍ، هو طورُ موجةٍ، بأيِّ مقدار.

(12) يعني تغيير الطور، عموماً، ضرب الدالة الموجية في عاملٍ هو $e^{i\emptyset}$. يجب عليَّ، في الحقيقة، رسمُ دوالَّ موجيّةٍ معقدةٍ، مثل اللوالب helices حول اتجاه سيرها، ورسمُ انتقال الطور بتقديم اللوالب قليلاً.

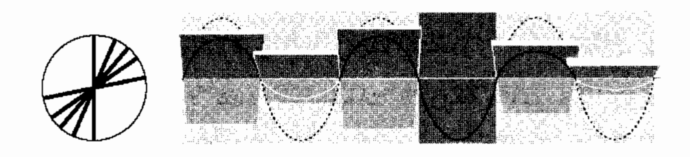
(13) إن U، كما ذكرنا سابقاً، هو الحرف الأوّل من «Unitary» (واحديّ). وتنشأ هذه السّمة الرياضية للزمرة من المتطلّب الفيزيائي بألاّ تكون الجسيماتُ مخلوقةً ولا محطمةً عندما يُنفّذ التناظر.



الشكل 6-13. تمثيل للتحويلات العيارية. يظهر الشكل العلوي الدّالّةَ الموجيّة لجسيمٍ طليق. أما المخطط السفلي فيبيّن كيف تتغير الدالة الموجيّة عند تعديل طورها بنفس القدر في كل مكان. اعتمدنا فتل الموجة حول اتجاه انتشارها للإشارة إلى تغير الطور. هذا وإن سَعَةَ amplitude الدالةِ الموجيّةِ لا يتغير نتيجة هذا التعديل، لذا فإن الدالة الموجية تنقل نفس المعلومات من موقع الجسيم. ومن ثم فإن التحويل العياري هو تناظر للنظام.

وعموماً، فإن التحويل العياريّ يمكن أن يأخذ في النقاط المختلفة قيماً مختلفة، وبكلماتٍ أخرى، يمكننا تعديلُ طور الدّالّة الموجيّة بمقدارٍ مختلف في كل نقطة (الشكل 6-14). لنفترض أننا نعمل ذلك، ونتطلّب من معادلة شرودينغر أن تظلّ على حالها دون تغيير، أيّ أننا نتطلّب أن تكون المعادلة لامتغيرةً عياريًّا gauge invariant بعد إجراء كل عمليات الزمرة U(1)، وهذا يسمح بحدوث انزياحاتٍ مختلفةٍ في الطّور في كلّ نقطة. والآن يبرز شيء شهير. فَلِلتوثُّقِ من اللاتغيّر العياريّ بهذا المعنى الأعمّ، نحن بحاجةٍ إلى إدخال حدٍّ آخر إلى المعادلة. وهذا الحَدُّ يكافىء أثر قوةٍ كهرمغناطيسيةٍ في الإلكترون. وبعبارة أخرى، فإن متطلّبَ اللاتغيرِ العياريِّ يستلزم وجود قوة كهرمغناطيسية. وبهذا المعنى نفهم أن متطلّبات التناظر تقتضي وجود قوة. فالتناظر يقوم بالدفع.

رأينا أنّ اللاتغيُّرَ العياريَّ لمعادلةِ شرودينغر، نتيجةَ زمرة عمليات التناظر التي أسميناها U(1)، يقتضي وجودة قوة كهرمغناطيسية، والسؤال الذي يجب أن يقفز إلى ذهننا هو: هل القوى الأخرى نتائج أيضاً للاّتغيّر العياريّ؟ أي، هل ثمة طريقةٌ جدُّ معقّدةٍ لإدخال تغييراتٍ طفيفةٍ إلى الدّوالّ الموجيّة للجسيماتِ بحيث أنّ



الشكل 6-14. حاولْنا في هذا المخطط إيضاحَ تحويلٍ عياريٍّ أعمّ. يغيِّر فيه الطورُ بمقادير تختلفُ من نقطةٍ إلى أخرى. لذا فإن زاوية الفتل بعيداً عن المحور الرأسي تختلف من نقطةٍ إلى أخرى (كما هو مبيّن في الشكل الصغير). وقد بسّطنا التمثيلَ بافتراض أنّ كلَّ نصفِ طولِ موجةٍ مفتولٌ بنفس المقدار: وفي التطبيق العملي، يجب أن يكون التغيير مستمرًّا. إن اللاتغير الناتج من هذا النمط من التحويل المعياريّ يستلزم وجودَ قوةٍ.

بقاء معادلاتها دون تغيير يتطلّب وجودَ حدودٍ إضافيةٍ يُمكنُ فهمها على أنها أنواعٌ أخرى من القوى؟ النجاح في هذه المحاولة لا بدّ أن يُبَيِّن أنّ لكلِّ القوى أصلاً واحداً.

لقد أنجز ستيفن واينبرك S. Weinberg (وُلِدَ عام 1933)، وعبد السلام (1926-1996)، وشيلدون كلاشو S. Glashow (ولد عام 1932) هذا التوحيد للقوتيْن الكهرمغناطيسية والضعيفةِ عام 1973، وأدّى عملهم إلى صَوْغِ النموذجِ المعياريِّ standard model للقوى الموحّدة، المقبولِ حاليًّا. إن زمرة العمليات التناظرية التي ابتكروها هي اتحادٌ للزمرة التناظرية U(1) التي أثمرت القوةَ الكهرمغناطيسيّةَ، ومجموعةٍ أخرى أكثر تعقيداً للتحويلات تسمَّى SU(2)، هي المسؤولة عن القوة الضعيفة. وحقيقةُ كَوْنِ زمرة التناظراتِ الإجماليّةِ هو اتحادَ U(1) وَSU(2)، الذي يُكْتَبُ بالصيغة U(1)xSU(2)، بنبئنا أن لهذيْن النمطيْن من القوى أصلاً مشتركاً. إنهما وجْهَا القوة الكهرضعيفة. لِنُعِدْ إلى الذاكرةِ تشبيه المكعب: فالقوةُ الكهرضعيفةُ مثل المكعب، والقوة الكهرمغناطيسية مثل رؤية مربع بتوجيهٍ واحدٍ للمكعب، والقوة الضعيفة هي مثل رؤية مسدّسٍ عند تدوير المكعّب باتجاهاتٍ مختلفةٍ.

وعند تكميم القوة الكهرضعيفة، يسبب القسمُ U(1) من النظرية نشوء فوتوناتٍ. أما SU(2) فيسبب نشوء ثلاثة جسيمات هي «البوزونات المتجهة

المتوسطة» المؤلفة م جسيمين W (لهما شحنتان مختلفتان)، وجسيمٍ Z ذي كهربائية معتدلة. ولجميع هذه الجسيمات الأربعة التدويم 1، وهي أمثلة على بوزونات عيارية. وقد اكتُشف الفوتون عام 1905 عندما كان آينشتاين يستوضح المفعولَ الفوتوكهربائيَّ photoelectric (الفصل 7)؛ أما الجسيمات W وَZ فقد اكتُشفت عام 1983 خلال التجارب التي أجراها مسرِّعُ سيرن CERN بسويسرا.

هذا وإن التناظرات العيارية التي كنا نناقشها لا يمكن أن تكون كاملة، بسبب وجود كتلةٍ للجسيمات W وَZ - وهي كتل كبيرة، إذ إن كتلةَ الجسيم W أكبر من كتلة البروتون ثمانين مرّة، وكتلةَ الجسيم Z أكبر من كتلة البروتون تسعين مرة - في حين لا يوجد كتلة للفوتون. وكما رأينا عند مناقشتنا تناظرَ التدويمِ النظيريِّ isospin للنكليون، والتناظُرَ المستتر للجدول الدوريّ، فإن التباين في الكتل يجب أن يحدُثَ نتيجةَ تفاعلٍ يكسر تناظر الجسيمات. ويُعزَى انكسار التناظر هذا إلى تفاعل الجسيمات W وَZ مع حق آخر يسمّى حقل هيكز Higgs field، وذلك مثلما يُعزَى التبايُنُ في كتلتي البروتون والنيوترون إلى اختلاف تفاعلهما مع الحقل الكهرمغناطيسي. وتعزى آليّةُ هيكز في اكتساب المادة إلى بيتر هيكز P. Higgs (ولد عام 1929) الذي اقترحها؛ وقد اقتُرحتْ آليّةٌ مشابِهةٌ، باستقلالٍ عن السابقة، من قِبَل رُوبِيْر بْرُو R. Brout وفرانسوا إنْكْليرْ F. Englert من جامعة بروكسل عام 1964. وبالطبع، فإن الحقول مكمَّمةً، لذا فالتفاعل مع الحقل الكهرمغناطيسيّ يعني، في الحقيقة، تفاعلاً مع جسيماتِ العقلِ المكمَّمِ، وهو الفوتونات. ويمكننا التفكيرُ في الفوتونات بوصفها مكثّفة على البروتون بقوةٍ أعلى من كثافتها على النيوترون، وهذا يخفض طاقتَهَا ومن ثُمَّ كتلتَهَا. ويحدُث نفسُ الشيء تقريباً مع الجسيمات المغمورة في حقل هيكز، لأن بإمكاننا التفكيرَ في كَمَّاتِ quanta حقل هيكز، التي تسمى جسيمات هيكز، بأنها مكثّفةٌ بدرجات متفاوتة على وسطاء القوة الكهرضعيفة. وتكون النتيجةُ اكتسابَ الجسيمات W وَZ كتلةً، لكن الفوتون لا يكتسب شيئاً منها.

إن صحة هذا التفسيرِ لانكسارِ التناظرِ واكتسابِ كتلةٍ يتوقّف على وجود

جسيمات هيكز. وحتى الآن، لم يَرَ أحدٌ هذه الجسيماتِ، وثمة تفسيران محتملان لهذا. الأوّل هو أنّ جسيمان هيكز ليس لها وجود، وهو تفسيرٌ يصعب جدًّا على فيزيائييّ الجسيماتِ قبولُهُ، ذلك أنّ حُجَجَ التناظُرِ التي تقتضي وجودَ وتوحيدَ القوتين الكهرمغناطيسيةِ والضعيفةِ قويّةٌ جدًّا. وإذا صَحّت تلك الحجّةُ، فعندئذٍ لا بدّ من وجود آليّةٍ لانكسار التناظر لمنح بعض البوزونات العياريةِ كتلةً. لذا، من الضروريِّ حقًّا أن يكون شيءٌ ما، مثل آليّة هيكز، فعّالاً، لأنّ كلَّ هذا ينهارُ في الحالة المعاكسة. وربما يجب أن يكون مثل هذا الشيء موجوداً. وإذا لم يحدث ذلك، فيمكن أن تكون جسيمات هيكز كبيرةً إلى درجةٍ أنه لم يستطع أيُّ مسرِّعٍ حتى الآن بلوغَ الطاقة اللازمة للعثور عليها. هذا وإن عالَمَ فيزياءِ الجسيماتِ ينتظر حاليًّا تطويرَ مسرِّعيْن ـ أحدهما في CERN، والآخر في Fermilab الذي يقع غرب شيكاغو ـ ليبلغا طاقة تكفي للحبث بفعالية أعلى عن جسيمات هيكز. وفي مرحلةٍ ما، سيجري العثور عليها، وإن لم يحدث ذلك، تعيّن على فيزياء الجسيمات إعادةُ النظر في واحدٍ من أكثر نماذجها أهميّةً. وآمُلُ أن يكون بإمكانك إدراكُ أهميّةِ هذا البحث، لأن ثقتنا بفهمنا الحالي للمادة يتعلق به.

لقد تبيّن أنّ القوةَ الشديدةَ أيضاً هي جلاءٌ للتناظر العياريّ. وفي هذه الحالة، نلاحظ أن الكواركات تمتلك، إضافةً إلى النكهة، نوعاً خاصًّا من الشحنة تُمكّنها من التفاعل بعضها مع بعض بواسطة تبادل الكليونات. ويمكن لكلّ كواركٍ امتلاكُ أيٍّ من هذه «الشحنات القوية» الثلاث؛ وقد أجمع الفيزيائيون بسرور على تسمية هذه الشحنات لوناً colour. ولا علاقة للّون هذا باللّون الحقيقي: إنه مجرد طريقة أنيقة للإشارة إلى الشحنة القوية. وهكذا فإن الشحنة اللونية لكوارك قد تكون حمراء أو خضراء، أو زرقاء. وكل الاتحادات المعروفة للكواركات (الثلاثيات التي تؤلّف البروتون، والنيوترون، واتحاداتِ الكواركاتِ مع الكواركاتِ المضادّةِ، التي تكوِّن الكليوناتِ) هي «بيضاء»: إنها خلائط من الشحنات اللونية التي يَنتج منه «البَيَاضُ»، دون أن تتبقّى شحنةٌ لونيّةٌ

أخرى، تماماً مثل كون اللون الأبيض الحقيقيّ مزيجاً من ألوان الأحمر والأخضر والأزرق الحقيقية[14].

سننتقل الآن إلى نمط جديد من التناظر العياري. إذا غيّرنا ألوانَ الكواركات بطريقة منهجية، محوِّلِينَ الألوانَ من مكانٍ إلى آخرَ، فإننا نجد المكافىء لتغيير طور الدّالة الموجيّة. وفي هذه الحالة ثمة ثلاث قيم، هي الألوان، بدلاً من طور واحد. وبدلاً من الزمرة البسيطة U(1) للقوة الكهرمغناطيسية وللزمرة التي هي أعقد قليلاً SU(2) للقوة الضعيفة التي هي أعقد قليلاً، علينا النظر في الزمرة، التي هي أعقد كثيراً، وهي زمرة العمليّات التناظرية المسماة SU(3). لكن تبيّن، مثلما رأينا في القوى الأخرى، أنه كي تظلَّ المعادلاتُ نفسَها دون تغيير، بعد هذا التحويل العياري، الذي هو أكثر تعقيداً، فإننا بحاجةٍ إلى إضافة حدٍّ إلى المعادلة يمثّل قوةً. وللحدِّ الإضافيِّ نفسُ خاصِّيَّات القوةِ الشديدةِ. أضفْ إلى ذلك أنه عندما نكمِّمُ هذه القوةَ، فإن البوزوناتِ العياريةَ التي تكف عن المشاركة في المعادلات ـ الجسيمات العديمة الكتلة ذات التدويم 1 ـ Spin-1 ـ المسؤولة عن نقل القوة بين الكواركات الملونة ـ هي الكليونات! وهنا نرى ثانيةً كيف أن احترام تناظر الطبيعة ـ الذي هو، في هذه المرّة، تناظر مستتر ومعقّد إلى حد ما ـ يؤدي إلى وجود حدٍّ نتعرّفه بأنه قوة.

يجب علينا الآن الخوض في مستنقع فكريّ ضبابي بحيث أنه إذا دخلنا في نوعٍ من الوحل المجرّد هناك، فإننا نتوقّع أن نجد مصادفةً توحيدَ القوتيْن الكهَرضعيفةِ والشديدةِ، وما يوافقهما، وهو توحيد اللبتونات والهدرونات في مكانٍ واحدٍ من حديقة الحيوانات. هذا وإن من المحتمل أن يكون التناظرُ مرشدَنا مرّةً أخرى. ويمكننا التوقّع بأن زمرةَ عملياتٍ تناظريةٍ ستنجح في إظهار أن القوةَ الشديدةَ والقوى الكهرضعيفة هي وجوهه مجرد مختلفة لقوة واحدة. وإذا رغبتَ في تشبيهٍ واقعيٍّ، بدلاً من مكعب يدور ويبيّن شكليْن، أحدهما مربع والآخر مسدس، فكِّرْ في شكلٍ أكثر تعقيداً هو متعدد السطوح الذي يُظهر مربعاتٍ

(14) ألوان المواد الفسْفوريّة الموجودة على شاشات أجهزة التلفاز هي الأحمر والأخضر والأزرق؛ وعند إضاءتها جميعاً بحزمةِ الإلكتروناتِ، فإننا نستقبلها باللون الأبيض.

ومسدّساتٍ في بعض المناظر، لكنه يبين مثمّناتٍ أو أشكالاً أخرى في مناظر أخرى: فكلّ الأشكال هي مظاهر جسمٍ وحيد[15].

تسمّى النظرية الموحّدة النظرية الموحَّدَةَ العظمى grand unified theory (GUT). وحتى الآن، فإن الناس غير متوثقين من هوية الزمرة التي هي أعلى تناظراً، وقُدِّمَ في هذا الصدد عدةُ اقتراحاتٍ مختلفةٍ. وتُساعد التجاربُ على توجيهِ الاختيارِ بينها وتقييمِهِ. فمثلاً، لمّا كانت الكواركات واللبتونات محشورةً في منطقةٍ واحدة من حديقةِ الحيوانات بعد أن كانت موجودة في مناطق مختلفة، فثمة احتمالٌ بأن يتحوّل الكوارك إلى إلكترونٍ؛ لذا قد ينتهي البروتون إلى التفكّك (الاضمحلال). إن أبسط خيارٍ للزمرة الكبرى، المسماة SU(5)، والتي هي اندماج للزمر SU(3) وَSU(2) وَU(1) العائدة للقوة الشديدة، والقوة الضعيفة، والقوة الكهرمغناطيسية، على الترتيب، يوحي أن طول عمر البروتون يقع بين 10^{27} وَ10^{31} سنة. بيْد أن التجارب تبيّن أن طول العمر هذا قريبٌ من 10^{32} سنة. ويشير هذا الانحراف إلى أن أبسط الخيارات لأغنى زمرة تناظرية غير ملائم، لذا تجري الآن دراسة تناظراتٍ أعقد. وإذا نجح البرنامج (وثمة شك غير كبير في ذلك، برغم التفاؤل الذي يتّصف به العلماء)، فسيكون لطول العمر المحدود للبروتون آثارٌ بعيدةٌ في مستقبل العالَمِ على المدى الطويل، وهذا موضوعٌ سنتناوله في الفصل 8.

تتكوّن حديقتنا من الفرميونات من اللبتونات والهدرونات، وهي تنزع الآن إلى التجمّع في منطقة واحدة. هناك أيضاً حديقةٌ للبوزونات، تقيم فيها الجسيمات المِرْسَالَةُ للقوى التي تربط الفرميونات معاً لتصبح بروتوناتٍ وبشراً، وتسمح في النهاية لمجموعات الفرميونات بالتعبير عن آرائها. هذه القوى هي مظاهر قوةٍ وحيدةٍ. فهل يمكن وجود زمرةٍ للعمليات التناظرية أضخم وأعقد في نوعٍ ما من الفضاء الداخليّ المجرّد ـ متعدد سطوحٍ أضخم وأعقد ـ يدوّر شيئاً ما بحيث يبدو وبوجه واحد فرميوناً، ويبدو بوجه آخر بوزوناً؟ ثمة اقتراحات تجريبية

(15) ثمة موقع رائع لمشاهدة جميع أنواع متعددات السطوح وهو:
http://www.georgehart.com/virtual polyhedra/vp.html.

مؤكَّدة مفادها أن مثلَ هذه الزمرة ذات التناظر الفائق supersymmetry group موجودٌ فعلاً، حيث يكون كل جسيم - إلكترون، ميزون، نيوترينو، كوارك، بوزون عياريّ، فوتون - وجهاً مختلفاً لشيء واحد. وبالطبع، لا بد من وجود أحداث كثيرة من انكسار التناظر بسبب وجود كتلٍ متفاوتةٍ جداً للجسيمات، لكن الجدولَ الدوريّ يعاني ذاتَ المشكلة، ونحن نعرف كيف نعالج اكتساب كتلٍ مختلفة، كأن نجعل جسيماتِ هيكز تلتصقُ بالجسيمات العديمة الكتلة بشدّاتٍ متفاوتةٍ. وإذا نجح التناظر الفائق supersymmetry في تبيان التكافؤ بين الفرميونات والبوزونات، فعندئذٍ يُصبح من المستحيل التمييزُ جوهرياً بين القوى والجسيمات، وسيغدو كلُّ شيءٍ شيئاً واحداً. التناظر يقتصدُ، والتناظرُ الفائقُ يقتصد بامتياز.

وحين تُسْتَكْشَفُ هذه الفكرةُ، فهي تقدم أماراتٍ قويةً على أهميتها. لكن النظرية تتنبأ أيضاً بوجود نماذجَ للجسيماتِ المعروفةِ. إن هؤلاء الشركاء ذوي التناظر الفائق supersymmetric prtners، الذين يتضمنون السِّلكترونات selectrons، والسكواركات squarks، والسْينتْرونات sneutrinos، والفُوتينات photinos، والوِينَوَات Winas، والزينوات Zinos، والكْلُوينات gluinos، تختلف جميعها عن شركائها التقليديين بنصف وحدة من التدويم spin. لذا فإن لسلكترونٍ، مثلاً، تدويماً صفرياً، ولفوتينٍ تدويماً يساوي النصف. والمشكلة هي: أين توجد هذه الجسيمات؟ الجواب العاديّ هو إما أنها غير موجودة (لأن الكوْنَ ليس فائقَ التناظر)، أو أنها ثقيلةٌ جدًّا إلى درجةٍ تجعل أيَّ مسرِّعٍ عاجزاً عن إنتاجها. لا أحدَ يعرفُ الجوابَ بَعْدُ، لكنّكَ إذا كنت تتذوّق الجمال وتستمتعُ به، فربما تكون نزّاعاً إلى الاعتقاد بأن العالَم جميل جداً، ومن ثم، فائق التناظر. ومع ذلك، فالاعتقاد هو موجِّهٌ، وليس معياراً، في العلم.

●

ثمة عدة أسئلة مهمة علينا مواجهتها، وربّما لاحظتَها خلال قراءتكَ لها. أحدها هو: لماذا تهيمنُ المادّةُ على المادّة المضادة؟ والثاني هو: إلامَ يعودُ السببُ في وجود ثلاث عائلات من الفرميونات؟ والثالث: ما السبب في وجود قدر كبير من

الجسيمات الأساسية؟ والرابع: لماذا تبدو الثقالةُ قوةً جدَّ مخادِعَةٍ في رحلتنا إلى توحيد جميع القوى؟ تُرى، هل تكمن الأجوبةُ عن جميع هذه الأسئلة في تناظر الكون؟ هل الكون أجملُ مما نظنه حاليًّا؟ أهو جميلٌ بلا حدود، وتناظريٌّ تماماً؟

حسناً، قد يكون فائقَ التناظرِ، لكنه، يقيناً، ليس كاملَ التناظر، لأنه لا يحوي مقاديرَ متساويةً من المادة والمادة المضادة. وثمة دلائلُ أخرى على أنّه يفتقر إلى التناغم والانسجام أيضاً. فمثلاً، معظم الناس يستعملون يَدَهُم اليمنَى. لا أَحَد في الحقيقةِ يعرف حقًّا السببَ في ذلك: فقد يكون ذلك مرتبطاً بكون القلب منزاحاً قليلاً إلى يسار الجسم[16]. لكنْ من غير المحتمل أن يقدّمَ حلُّ هذه المشكلةِ فهماً عميقاً لطبيعة الكون. وبقدرٍ أعمق قليلاً في بنيتنا، تكمن الحموضُ الأمينية التي عندما ترتبط معاً وفق لفّاتٍ أو ملاءاتٍ، فهي تكوّن جميعَ البروتيناتِ المهمةِ التي تحكم عمليّاتِ الحياةِ (الفصل 2). وتتّخذ جزيئاتُ الحموضِ الأمينيّةِ شكليْن، كلٌّ منهما خيالٌ مِرْآوِيٌّ mirror image للآخر. وإنّها لحقيقةٌ حياتيةٌ أن يَكُونَ للحموضِ الأمينيّةِ ـ على الأرض في الأقل ـ الموجودة في بروتيناتنا، يسارية left-handed أيضاً (فهي يساريةٌ وفقاً لمعايير تقنية معينة). لا أحد يعرف سبب ذلك، فقد يكونُ مصادفةً بحتةً: أي أن سلفاً بعيداً مشتركاً لنا تعوّد استعمالَ حموضٍ أمينيةٍ يساريةٍ، وكلُّ الأشياء الحية التي تَحَدَّرَتْ منه صارت يساريةً. لكن البعض خمّن أنّ هيمنةَ الحموضِ الأمينيةِ اليساريةِ مرتبطةٌ بعد الانسجام الكونيّ للعالم، وما يساريّةُ الحموض الأمينية إلاّ من الأشياء التي تحظَى باستقرارٍ أكثر قليلاً من صورها المرأوية اليمنية right-handed. لا أحد يعرف السببَ في الحقيقة، لكن من المؤكّد أنه سيكون شيئاً جذّاباً ولافتاً للنظر أنْ يكونَ بالإمكان نَسْبُ هذه السلسلةِ من السِّمات اليسارية إلى شيءٍ أساسيٍّ

(16) إن تفضيل استعمال اليد اليمنى لدى البشر (وهذا أقل كثيراً من الحيوانات) قد يكون له أسبابٌ تطوّريّةٌ تتجلّى في ميل الأمّهات من البشر إلى حمل أطفالهنّ على جانبهن الأيسر ليكون الأطفال أقرب إلى قلبهن. وهؤلاء الأمهات تكُنَّ عندئذٍ أقدر على استعمال اليد الطليقة التي لا تحمل الطفل. وقد أُجريتْ دراساتٌ على الهيكل العظميّ الأوسط في محاولةٍ للتمييز بين الضغوط الثقافيّة الحديثة عن الميول الفطرية. وأقوى نظرية هي أن استعمال اليد اليمنى نشأ عن الحاجة إلى إعطاء فسحةٍ للدماغ كي يتطورَ الكلامُ خلال العملية التطورية. راجع الموقع:
http://www3.ncbi.nlm.nih.gov/htbin.post/omim/dispmim?149900.

حدث في الماضي. وإنه لممّا يساعدنا كثيراً حلُّ هذه المشكلةِ لنعرفَ ما إذا كان لبروتيناتِ العضويّاتِ، التي قد تكون موجودةً في مكانٍ آخرَ من الكون، نفسُ السِّمة - اليساريّة أو اليمينيّة - التي تتّسم بها تلك العضويّات الموجودة على الأرض[17].

ما الذي نعنيه بكوْن العالَم مفتقراً إلى الانسجام lop-sided؟ في عالَمٍ متناظر تماماً تكون الأحداث التي تظهر في المرآة غير قابلة لتمييزها من الأحداث نفسها. وفي الحقيقة، لا يمكننا القول البتة ما إذا كنّا ننظر إلى الكون مباشرةً أو إلى صورته في مرآةٍ. المصطلحُ التقنيُّ لهذه الحالةِ المثاليّةِ هو انحفاظ المماثلة conservation of parity. لكنْ تبيَّن أنّ نتائجَ بعض التجارب التي أُجريتْ عام 1957 يمكن تمييزُها من صورها المرآوية، ومن ثَمَّ فالمماثلة غير منحفظةٌ. ليس الكونُ هو نفسَ صورتِهِ في المرآة، إنه منحرف مكاني.

إن كونَ العالَمِ غيرَ منسجمٍ مكانيًّا يثيرُ احتمالَ كونه غيرَ منسجمٍ زمانيًّا أيضاً. وفي عالَمٍ متناظرٍ زمنيًّا، تكون القوانينُ الطبيعيّةُ هي نفسَهَا عندما نعود بهذا العالَمِ زمنيًّا إلى الوراء أو إلى الأمام، لذا لا يمكننا القولُ ما إذا كان العالَمُ بدأ في الزمن 0، وأنه يسير زمنياً إلى الأمام، أو أنه بدأ في الزمن 0 وأنه يسير زمنيًّا إلى الخلف. وبوجه أكثر تحديداً، وبمقياسٍ أصغر، فإن اصطدمَ جسيْميْن لتكوين جسيماتٍ جديدةٍ، يعادلُ العملية العكسية التي يصطدم فيها هذان الجسيمان ليكوّنا الجسيماتِ الأصليّةَ. المصطلحُ التقنيّ لهذا التناظر هو لا تَغيُّرُ عكسي الزّمنِ tie-reversal invariance، لكنْ تبيَّن من التجارب التي أجريتْ عام 1964 أنه في زاويةٍ صغيرةٍ هادئةٍ من حديقة الجسيمات[18]، فإن اتجاه الزمن مهمٌّ. وعدم الانسجام مرتبطٌ ارتباطاً وثيقاً باللاتناظر بين المادّةِ والمادّةِ المضادّةِ، الذي نشأ خلال اللحظات الأولى من تاريخ الكوْن، وسنتابع سَرْدَ هذه الحكايةِ في الفصل 8.

(17) توجد هنا مجازفة أخرى للسفر الفضائي. فإذا كانت الحياة على كوكب آخر مكوّنةً من حموضٍ أمينية يمينيّةٍ، فعلى المسافر من الأرض أن يحضر معه، شطائر اللحوم المعدَّة على الأرض ليتناولها عندما يجوع.

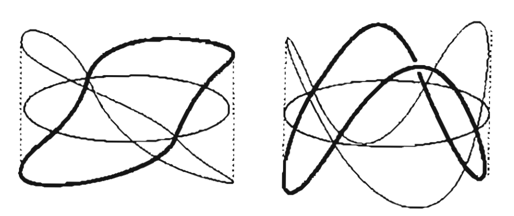
(18) اضمحلال (تفكك) الميزونات المعتدلة k، وهي الكايونات kaons.

لذا تُبَيِّنُ التجاربُ أنّ العالَمَ غيرُ منسجمٍ في المكان والزمان. لكنّ عدم الانسجام هذا ليس مجرّدَ لاتناظرٍ عشوائيٍّ، لأنّ عدم الانسجام في المكان مرتبطٌ بعدم الانسجام في الزمان. ولفهم هذه الرابطة، لا بدّ لنا من معرفة أن ثمةَ نمطاً ثالثاً من عدم الانسجام يُسمّى اقتران الشحنة charge conjugation حيث يحلُّ محلّ كلِّ جسيم جسيمُهُ المضادُّ. قد نتوقّع عالَماً يجري فيه تبادلٌ بين الجسيمات والجسيمات المضادة ليستحيل التمييز بينها وبين أصلها الذي كانت عليه الحال ليس كذلك. فالقوة الضّعيفة لا تقيم وزناً للاّتغيُّرِ اقتران الشحنة، لذا فإن عالَماً تحلّ فيه المادةُ المضادّةُ محلَّ المادّةِ لا بد أن يسلكَ سلوكاً مختلفاً عن هذا العالَمِ. (ويمنحنا هذا الاختلافُ الفرصةَ لتعرّف منطقةِ مادّةٍ مضادةٍ من العَالَمِ قبل التوجُّهِ الكارثيِّ إليها).

وإذا أبقينا في ذاكرتنا هذا الانهيار في التناظر، فسيتبيّن أنّ الكون تناظري (بقدر ما نعلم) إذا قمنا بتغيير الجسيمات إلى جسيمات مضادة في آن واحد (سنرمز إلى هذا بالحرف C)، وأظهرنا العالم في مرآةٍ (سَمِّ ذلك P)، وعكسنا اتجاه الزمن (الذي يُكتَبُ بالحرف T). وهذا يعني، استناداً إلى نظريةٍ اقترحها باولي Pauli، أن العالَمَ لامتغيّر invariant CTP. لذا فالعالَ غيرُ منسجمٍ في التغيرات الفرديّة، لكنه كامل التكوين إذا فكرنا في إطار هذا العمل المركّب.

●

إن أكبرَ سؤالٍ متروكٍ للمعالجة هو الطبيعةُ الإجماليّةُ للجسيمات التي دفعنا بها إلى المسرح. وحاليًّا، ثمة جهودٌ جبّارةٌ تُبذَل في فيزياء الجسيمات لإنشاء مشروع نظريٍّ قد يملكُ الجوابَ، لكنْ لا يمكن أبداً القيامُ باختبارٍ تجريبيٍّ مباشر له. وإذا عدنا إلى ما ذكرناه سابقاً عن اليونانيين الذين كانوا يتصوّرون تقسيمَ المادّة، وتخمينَ المدى الذي يمكن أن يقطعوه في هذه العملية، فإن افتراضهم الضّمنيَّ كان أنهم سيبلغون أشياءَ بالغةَ الصّغر شبيهةً بالنّقط. وكانت تمثل لهم هذه النقاطُ ذرّاتٍ؛ أمّا نحن فنفكّر في اللبتونات والكواركات العديمة البنية ظاهريًّا بأنها نقاط. لكنْ لنفترضْ أنها ليست كذلك. لنفترضْ أنّ النتيجةَ النهائيةَ للتقسيم



الشكل 6-15. نمطان لاهتزازٍ صفريِّ النقطةِ لوترٍ، ويقابل كلَّ نمطٍ منهما جسيمٌ أوّليٌّ مختلفٌ عمّا يمثله النّمطُ الآخر.

ليس نقطةً؛ بل خط مستقيم. هذه هي نقطة البداية في نظرية الأوتار string[19] theory. التي تَعِدُنَا بإيضاحِ كثيرٍ من الأسئلةِ التي طرحناها. نظرية الأوتار هي توسيعٌ لحجج التناظر التي قابلناها في هذا الفصل، لأنها تتضمّن طبولوجيا الزمكان، وامتدادَه، واحتمالَ أن يكون حاوياً على ثقوبٍ، إضافةً إلى التحويلات الهندسية الصّلبة التي درسناها حتى الآن.

في نظرية الأوتار، نفكّر في دائرةٍ وترية صغيرة بوصفها اللّبنة الأوليّة للطبيعة. الوتر صغير جدًّا: فنصف قطر الدائرة قريبٌ من طول بلانك (نحو 10^{-35} متر، الفصل 7). إنّ كلمة جدًّا في الجملة السابقة تعني فعلاً كلمة جدًّا. فإذ كبّرنا نواةً لتصبح بحجم أرضنا، فإن الوتر يصبح دائرةً ليست أكبر من النواة الأصلية. إن توتّره يعادل التوتُّر الناشىء من وزنٍ قدره 10^{39} طناً متدلّياً منه، وهذا يعادل تريليون شمسٍ. نحن نتحدث حديثاً جادًّا عن أوتارٍ صلبةٍ صغيرةٍ.

الأوتار الصّلبة (الجاسئة) stiff تهتزّ. ووفقاً لنظرية الأوتار، فكلّ نمطٍ مختلفٍ من الاهتزاز يقابلُ جسيماً أساسيًّا. لذا ثمة نوعٌ واحدٌ فقط من الأوتار، لكنّ أنماطَ اهتزازها المختلفةَ تقابل جميعَ الجسيمات المختلفة التي قابلناها حتى الآن (الشكل 6-15). أنا لا أعني أن الجسيماتِ المختلفةَ تنشىءُ بواسطةِ زيادةِ تواترِ (تردّدِ) الاهتزازِ، مثلما نفعلُ عندما نعزف نغماتٍ موسيقيةً مختلفةً على آلة الغيتار: فهذا يأخذ كثيراً من الطاقة. وحتى إذا قمنا بإحداث أوّل نغمة توافقية overtone، فإنها تتطلب قدراً كبيراً من الطاقة توافق جسيماً ذا كتلةٍ ضخامتها تتعدى كتلة أيّ جسيمٍ أساسيٍّ معروفٍ ـ وهذه الكتلة قريبةٌ من كتلة جرثوم[20]

(19) تسمى نظرية الأوتار نظرية الأوتار الفائقة superstring theory أيضاً، لأنها تتضمن سماتِ التناظرِ الفائقِ الذي يربط بين الفرميونات والبوزونات الذي سبق وذكرناه.

(20) وهي تعادل كتلة بلانك (الفصل 8) تقريباً، أي نحو 10^{19} كتلة بروتونية.

صغير. الاهتزازات هنا هي المسماة الاهتزازات الصفريّة النقطة zero-point vibrations للوتر. ووفقاً للميكانيك الكموميّ، لا يمكن البتّة لهزّازٍ oscillator أن يكون ساكناً تماماً، إذ إنه دائماً يمتلك على الأقل طاقةً متبقيةً طفيفةً، هي طاقته الصفريّة النقطة. فكّرْ في الوتر بوصفه ينبض بهدوءٍ مثل قلب إنسانٍ، وكل نمط من نبضاته يقابل جسيماً مختلفاً.

عندما كانت نظرية الأوتار في مرحلة انطلاقها الأولى، استطاعت توفير وصفٍ للبوزونات، لكنها عانت الإرباك التالي: يجب أن توجد نظرية الأوتار في زمكان له ستة وعشرون بعداً. إرْبَاكُ الأعداد embarrasse de dimensions هذا زال جزئيًّا عندما أُدْخِلَ التناظرُ الفائقُ. وكذلك الفرميوناتُ في النظرية. إن القيودَ التي اقتضاها التناظر الفائق أسفرت عن اكتشاف أن الأوتار يمكن أن تنجح وتنمو بقوّة في عشرةِ أبعادٍ فقط للزمكان، وبعدٍ واحدٍ للمكان، وواحدٍ للزمان. وقد اقتُرِحَتْ عدّةُ طرائقَ لتنظيم تلك الأبعاد، ويبدو حاليًّا كما لو أنّ النظرياتِ المختلفةَ يُمكن توحيدها في نظريةٍ فائقةٍ واحدةٍ، إذا سُمِحَ للأبعاد أن تزداد إلى 11. سنعتمد هذا العدد، ونفترض أن نظرية الأوتار تُعنَى فقط بالأوتار المهتزّة في عشرة أبعاد. الصيغة الحاليّة لنظرية الأوتار - في أحد عشر بعداً، وبصيغٍ أعقد للأوتار الوحيدة البعد التي تتضمن أغشية membranes ثنائية البعد - تُسمّى النظريةَ M M-theory، ويبدو أن الناس نَسُوا ما الذي يعنيه الحرف M: من المحتمل أن يكونَ الحرفَ الأوّلَ من كلمة «membrane»، لكنْ قد يكون أيضاً دلالةً على «mother of all theories» - أمّ جميع النظريات.

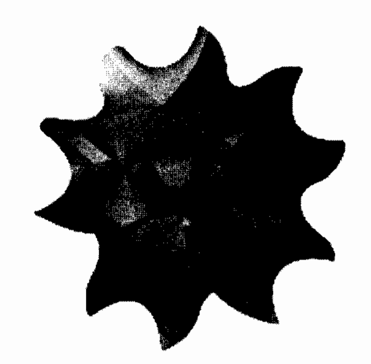
السؤال الفوريُّ الذي يقفز إلى الذّهن هو: أين توجد كل هذه الأبعاد؟

نحن رُبِّينَا على الإيمان بأننا نقيم في عالَمٍ رباعي الأبعاد (ثلاثة للمكان وواحد للزمان)، لذا أين الأبعاد السبعة الأخرى؟ يُفترضُ أنّها مطويٌّ بعضها على بعض. وأنها لم تنجح في الانتشار عندما تكوّن العالَمُ: إذا حدث التمدّد الأوّليّ للعالَمِ بسرعةٍ عاليةٍ (كما سنرى في الفصل 8) لم تُفْسِحِ المجالَ للأبعاد السبعة للاستيقاظ إلاّ في وقت متأخر جدًّا. والتشبيه الواسع الاستعمال الذي يرمي إلى

تسهيل استيعاب مفهوم انتشار الأبعاد من قِبَلِ عامّة الناس، هو خرطوم (أنبوب) مياه في مرج. إنه يبدو من بعيد خطاً وحيدَ البعدِ، لكننا نرى أن له ثلاثةَ أبعادٍ عند الاقتراب كثيراً منه.

لتصوُّرِ بُعْدٍ متراصٍّ compactitied واحدٍ، يمكننا التفكير في دائرةٍ صغيرةٍ- تشير الأمكنةُ عليها إلى مواقع على طولِ ذلك البعد- مرتبطةٍ بكّل نفطةٍ منالفضاء (الشكل 16.6). وكي نتصور تصادماً في هذا الفضاء، تتوقف على التفكير في النقاط المتصادمة، وتفكّر في أحزمة مطّاطيةٍ تتلوّى على الخرطوم، وترتدُّ إلى الخلف مبتعداً أحدها عن الآخر. وفي الواقع ثمة سبعةُ أبعادٍ مدمجةٍ بهذه الطريقة في كل نقطةٍ، حيث الأوتار ملفوفةٌ حولها، مثل شريط مطّاطيٍّ ملفوفٍ حول خرطومٍ. ويجري التفكير في الأبعاد المدمجة بأنها تعتمد شكلاً خاصاً في كلِّ نقطةٍ، تُسمّى هذه الأشكالُ فضاءات كالَابِي - يَاوْ Calabi-Yay نسبةً إلى عالِميَ الرياضيّاتِ يوجينيو كالابي E.Calabi، وشينك-تانك ياوَ S-t Yau، اللذيْن درساها. الفيزيائيون مدينون بالفضل دائماً للرياضيين، الذين بأسلوبهم المدهش درسوا كثيراً من المفاهيم التي كانت تبدو عقيمةً ظاهرياً في الكينونات المجرّدة، واكتشفُوا في وقتٍ لاحق بطريقة غير متعمّدةٍ أنّهم كانوا يُعدُّون الأدواتِ اللازمة لتعاملِ مع التطوراتِ في علم الفيزياء. ومن وجهة نظرٍ أفلاطونيةٍ (انظر الفصل 10)، فإن الرياضيات كانت موجودة بانتظار اكتشافها، ومن ثمَّ فربما كان كالابي وياو يبحثان عمّا هو قَبْليٌّ الوجود، بدلاً من مجرّد الابتكار. ويوضح الشكل 6-17 أحدَ هذه الفضاءات. إن أشكالاً مثل هذه- في سبعة أبعاد- هي خراطيمُ لمياهِ نظريةِ الأوتار، لأن الأوتار تلتفُّ حولها وعبر ثقوبها.

الشكل 6-16. ما يبدو أنه خطٌّ وحيدُ البعدِ عليه جسيمان شبيهان بالنقط، هو في الحقيقة أنبوبٌ ووتران دائريان ملفوفان حوله. البعد الإضافيَ مدمَجٌ، ونحن لا ندرك وجوده إلاّ عندما نستفسر عن البُنية العميقة للواقع إن تصادماً بين جسيمين، هو في الحقيقة تصادمٌ بين وترين.



الشكل 6-17. فضاء كالابي ـ ياو. وبدلاً من خطٍّ في الفضاء، هو أنبوبٌ (خرطوم) بسيطٌ، مثل ذاك المبيَّن في الشكل 6-16، من الممكن أن تكون كلُّ نقطة على خطٍّ هي، في الحقيقة، فضاءٌ متعدّدُ الأبعاد، تَظْهَرُ شريحةٌ منه في هذا الشّكل، فكر في مثل هذه البنية (لكن في أبعادٍ أكثر) بأنها ملحقةٌ بكل نقطةٍ في الفضاء.

ويبدو أنّ النظرية M تتجه نحو الإجابة عن واحد من الأسئلة الكبرى هو: ما السبب في وجود ثلاث عائلات من الجسيمات؟ يبدو أن الجواب يكمن في التناظر. لكن التناظر هذه المرة، هو خراطيمُ مياهِ كالابي ـ ياو، وهو يرتبطّ بعدد أبعاد ثقوب هذه الفضاءات، وهي الثقوب التي تُسلِّكُ threaded فيها الأوتار، التناظر هو اروع ما وجدناه حتى الآن. وإذا عُولج فضاء كالابي–ياو بطريقةٍ معيّنة، فسيتبّين أن عدد الثقوب ذات البعد الزوجيّ في الفضاء الجديد يساوي في عدد الثقوب ذات البعد الفردي في الفضاء الأصليّ. ويتحدّد عددُ العائلات بعددِ أنماطِ التّسليك threading ومن ثَمَّ بعدد الثقوب. وتوجد هنا إشارةٌ خفية ـ وهي هنا ليستْ أكثر من ذلك ـ إلى أنّ عدد عائلات الجسيمات مرتبطٌ ارتباطاً وثيقاً بالطريقة التي يُدْمَجُ (يُرَصُّ) بها الزمان، وأن العدد ثلاثة ربما كان يَحظى بأهمية خاصة.

السؤال الكبير الثاني هو: لماذا تُنْشَرُ ثلاثةُ أبعادٍ مكانيةٍ فقط لمنحنا الأبعادَ الثلاثة لفضائنا؟ تَسمح نظريةُ الأوتار باقتراحِ جوابٍ عن هذا السؤال. لكن الجواب سيقدَّم في الفصل 8 الذي عنوانه الكوسمولوجيا.

لنظرية الأوتار، والنظرية M التي هي أكثر تفصيلاً، قوةٌ مذهلة. لكنها قد تخرج عن نطاق العِلْمِ. وقد حَذَّرْتُ في وقتٍ سابقٍ بأنني كنتُ أُعِدُّ عقولُكُمْ لِتَقَبُّلِ احتمالِ أنه سيتعيّم على العِلْم أنْ يعدِّلَ معاييرَهُ في القبولِ، ذكرتُ هذا عندما تحدّثنا عن الكواركات التي لم تُشاهَدْ، وربّما لن نتمكّن من مشاهدتها، لكنّ ثقتَنا

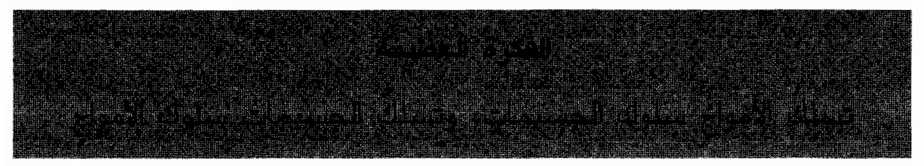
تتزايد بوجودها، بنفسِ قدْرِ وثوقنا بما يترتب عليها. هذا تحقّق بواسطة الاقتضاء، لا تَحَقُّقٌ بواسطة التجريب: تحقُّقٌ بواسطة المناقشات، لا بواسطة الخبرة المباشرة. وقد تَرِدُ هناك نقطةٌ يمكن أن يُخْترَقَ فيها الخطُّ، لكن هذا قرار يتعين على العِلْمُ اتخاذُه بحرصٍ شديد.

وتشجّعنا النظرية M التي هي تمجيد التناظر التي تكمن في قلب هذا الفصل ـ على السيْر خطوةً أخرى على طول هذا المسار الخطر. لا وجود لدافعٍ تجريبيٍّ مباشر لقبولِ النظرية M: إنها فكرة ذات جمالٍ أخّاذٍ، وتقدمُ اقتراحاتٍ لكيفية حلِّ مسائل عميقةٍ، لكنها لم تقدِّمْ أيَّ تنبؤٍ عدديٍّ. إنها تقترح طرائق لمعرفة سبب مواضيع واسعة، مثل عدد عائلات الجسيمات، لكنْ لمّا كان يوجد عشرات الآلاف من فضاءات كالابي ـ ياوْ، فهناك إشارةٌ خفيّةٌ إلى أنّ النظرية تتوقع الاتجاه السليم أكثر من تقديمها تنبؤاتٍ غيبيّةً. وما يوجِّهُ الاختبارات التجريبية التي تقترحها يتطلّب تجهيزاتٍ لها مقاييس مجريّةٌ، بلْ حتى كونيّة، ومن المحتمل أن تكون خارج قدراتنا التّقانية إلى الأبد. وما تقترحه هذه النظرية بطريقةٍ غير مباشرةٍ مثيرٌ جداً للاهتمام. وعلى سبيل المثال، تتنبأ النظرية M بوجود بوزونٍ عديم الكتلة تدويمه 2، وهو الغرافيتون graviton. لذا فإن الثقالة تقع في متناولها، ويمكننا الاعتقادُ بحذرٍ أن آخِرَ القُوى وأكثرَها مخادعةً يمكن توحيدها مع القوى الأخرى بواسطة هذه النظرية. هذا وإن العلماء الذين يُجْرون بحوثهم لتقييم النظرية M يتوقون حقاً إلى أنه تكون صحيحة، إذْ إنّها رائعةُ الجمال، لكنني قلتُ سابقاً، وأعيد تأكيد ما قلتُه ثانيةً، إن قوّةَ الإيمان لا تكفي وحدَها في العِلْمِ.

الفصل 7

الكُموم

تَبْسِيطُ الفَهْم



كلُّ منْ يزعمُ بأنه يعرفُ النظريَّة الكموميَّةَ (الكوانْتيّةَ) تماماً، فهو لَمْ يفهمْهَا
ريتشارد ـ فاينمان

كنا نَحومُ حول ضفاف بركةِ الميكانيكِ الكموميِّ (الكوانتيِّ)، مطلقينَ العنانَ لإحدى أصابع قدمينا بأن تنغمس في هذه البركة، وهذا شيء خَطِرٌ. وقد آن الأوان للغطس فيها. ولتقدير أهمية آثار هذه النظرية الاستثنائية، يترتب علينا ملاحظةُ أنه حتى نهاية القرن التاسع عشر، كانت الأمواج تموج دونما غموض، وكانت الجسيمات معروفة بأنها أجسامٌ دقائقيةٌ بالغة الصّغر. ومن حسن حظ الفهم السليم، فإن هذا الفرق غاب بحلول منقلب ذلك القرن. ونتيجةً لمجموعةٍ من الملاحظات المتفرِّقة التي كانت تحدث حتى نهاية القرن، دخل فيروسُ الفيزياءَ التقليديَّة (الكلاسيكيّة) classical. وبعد مرور بضعة عقود من القرن العشرين، كان المرضُ الذي أحدثه ذلك الفيروس قد دمّر الفيزياء التقليدية تدميراً تامًّا. ولم يكتفِ الفيروسُ بإلغاء بعضِ المفاهيمِ الأساسيّةِ في الفيزياءِ التقليديّةِ، مثل الجسيْمِ، والموجةِ، والمَسَارِ trajectory، بل إنه، أيضاً، حوّل فهمَنا الرّاسِخَ لنسيجِ الحقيقةِ إلى أشلاء.

وقد حلّ محلَّ الفيزياءِ التقليديةِ ـ فيزياءُ نيوتن والذين خَلَفُوه مباشرةً (الفصل 3) ـ الميكانيكُ الكموميُّ (الكوانتيُّ) quantum mechanics. ولم يحدثْ

قبلَ ذلكَ قطّ أن نشرتْ نظريةٌ ماديةٌ مثلَ هذا الرعبِ بين الفلاسفة. ولم يحدثْ قَبْلَ ذلك قطّ أن حظيتْ نظريةٌ في المادة بموثوقيةٍ بين الفيزيائيين مثل هذه النظرية. لَمْ يلاحَظ اعتراضٌ على تنبؤات الميكانيك الكموميّ، ولم تُخْتَبَرْ نظريةٌ سابقاً بمثل هذا الكمّ الكبير من الاختبارات، وبمثل هذه الدقة العالية. المشكلة هي أنه بالرغم من إمكاننا استعمال هذه النظرية بمهارةٍ فائقةٍ، وبالرغم من الانخراط نحو مئة سنة في المناقشات، فلا أحد يعرف تماماً ما الذي يعنيه هذا كلُّهُ. ومع ذلك، قُدِّرَ أنَّ قرابةَ 30 بالمئة من الدّخل الإجمالي المحلّيّ للولايات المتحدة يُنفق على تطبيقاتِ الميكانيك الكموميّ بطريقةٍ أو أخرى. هذا ليس شيئاً سيّئاً لنظريةٍ لا يفهمها أحد. فكّر في احتمال ما يمكن أن يحدث لتعزيز أسباب الحياة (وأيضاً، تعزيز أسباب الموت نتيجة تطوير صناعة الأسلحة الكموميّة) في حال فهمنا لهذه النظرية.

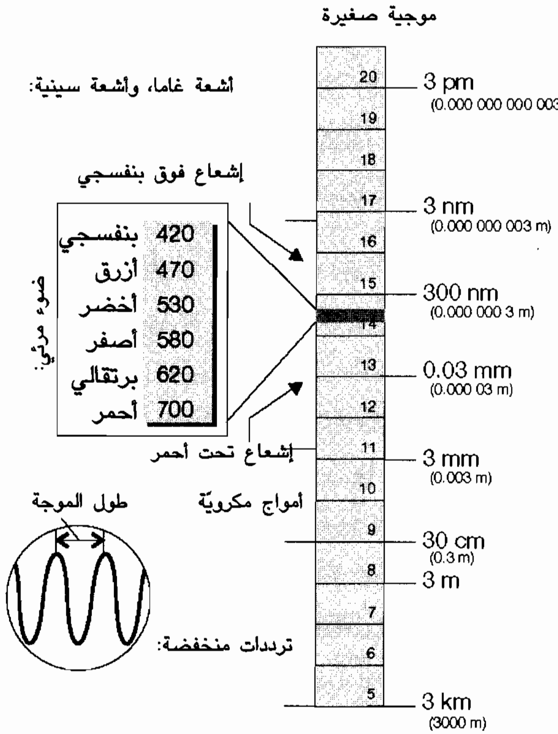
●

إن الفيروس الذي كان سيدمِّرُ الفيزياءَ التقليديةَ عُرِفَ أوَّلَ مرّةٍ في أواخر القرن التاسع عشر من قِبَلِ فيزيائيِّينَ كانوا يدرسون مسألةً عويصةً تتعلّق بالضوء الذي يُصْدِرُهُ جسمٌ ساخنٌ. ولفهم ما حدث، نحن بحاجةٍ إلى معرفة أن الضوء شكلٌ من أشكال الإشعاعِ الكهرمغناطيسيّ electromagnetic radiation، الذي يعني أنه مؤلَّفٌ من أمواجِ حقولٍ كهربائية ومغناطيسية تنتشر بسرعة الضوء(1).

إن طولَ موجةِ الإشعاعِ (أو الطول الموجيّ للإشعاع) هو المسافة بين ذروتين للموجة، وهو يُساوي، في حال الضوء، 5 من عشرة آلاف من المليمتر. ويقول كلُّ شخصٍ إن هذا الطولَ صغيرٌ جدًّا: إنه كذلك، لكن من الممكن تصوّره تقريباً ـ فكّر في أن مليمتراً قُسِّمَ إلى ألف جزء، ثم قُسّم أحد هذه الأجزاء إلى نصفين. إن الألوان المختلفة للضوء تقابل أطوالاً موجيّةً مختلفةً للإشعاع، إذ

(1) قيمة c هي 2.998×10^8 متر في الثانية، وهذا يساوي قرابة 186,000 ميل في الثانية، أو 687 مليون ميل في الساعة.

يوجد للضوء الأحمر طولٌ موجيّ كبيرٌ نسبياً، وللضوء الأزرقِ طولٌ موجيٌّ صغيرٌ نسبيًّا (الشكل 7-1). الضوء الأبيض مزيجٌ من جميع ألوان الضوء. وللتغيرات الطفيفة في الطّول الموجيّ نتائج هامة: فعندما يتغير ضوء إشارة المرور من الأحمر إلى الأصفر إلى الأخضر، فإن الطول الموجيّ ينخفض من 7.0 إلى 5.8، ثم إلى 5.3 من عشرة آلاف من المليمتر، ويتصرف سائقو السيارات وفقاً لهذه الفروق البالغة الصغر. هذا وإن الإشعاعَ المكرويَّ الموجةِ المستعمَلَ في الأفرانِ المكرويّةِ الموجةِ هو، أيضاً، إشعاعٌ كهرمغناطيسيٌّ، لكنّ طول موجته عدة سنتيمترات، لذا من السهل تصوُّرُ هذا الطول.



الشكل 7-1. هذا هو الطيف الكهرمغناطيسيُّ الذي يبيِّنُ تصنيفَ المناطقِ المختلفةِ وتحتوي المنطقةُ المرئيةُ من الطيف على مجال جدّ ضيّقٍ من الأطوال الموجية، وإن الأطوالَ الموجيَّةَ (المسافة بين ذروتينْ متجاورتين للموجة، كما هو موضّح في الدائرة اليسرى) للألوان الموافقة التي نستقبلها، تُعطَى بالنانومترات (بإجزاءٍ من البليون من المتر) في صندوق «الضوء المرئي». إن الأعداد الواردة في المستطيل الضيق الرأسي الرمادي اللون هي قوى العشرة للتردّد المقدّر بالدّورات في الثانية (هرتز Hz). فالعدد 8، مثلاً، يدل على تردّدٍ قدره 10^8 هرتز (مئة مليون دورة في الثانية). إن تصنيف المناطق ليس بالغَ الدقة، ولا وجود لحدٍّ أعلى أو أدنَى للطيف.

نحن بحاجة أيضاً إلى معرفة ما يعنيه مصطلح التَّرَدُّد frequency: فإذا تصوّرتَ أنكَ تقفُ في نقطةٍ تجتازها موجةٌ، فإن التردّد هو عدد الذّرَا التي تتجاوزُكَ في الثانية. وللضوء ذي الطول الموجيّ الكبير تردُّدٌ منخفضٌ، لأنه لا يتجاوزك إلاّ ببضع ذرًا في الثانية، وللضوء ذي الطول الموجي الصغير تردّد عالٍ، لأن عدداً كبيراً من الذُّرَا يتجاوزك كل ثانية. أما الضوء المرئي، فتندفع عبركَ قرابة 600 تريليون (6×10^{14}) ذروة في الثانية، لذا فإن تردده هو 6×10^{14} دورة cycle في الثانية (6×10^{14} هرتز Hz). وللضوء الأحمر تردد منخفض نسبياً، يساوي زهاء 440 تريليون دورة في الثانية؛ وللضوء الأزرق إشعاع عالي التردد نسبياً، يساوي نحو 640 تريليون دورة في الثانية. ونحن نفهم هذا الإشعاع بوصفه ألواناً مختلفة، لأن المستقبِلات المختلفةَ في عيوننا تستجيبُ للتردّدات المختلفة. الأعدادُ الحقيقيّةُ الواردة في الشكل لا تؤدي دوراً فيما يلي، لكنها جزء من ثقافةٍ عامةٍ، لذا يجب معرفة المقادير الحقيقية لهذه الأعداد، والمناطق المختلفة للطيف الكهرمغناطيسيّ.

وقد عُرِفَت سمتان مميِّزتان لضوءٍ صادرٍ عن جسمٍ متوهجٍ. سُمِّيَ هذا الضوءُ «إشعاع» الجسمِ الأسودِ، وذلك في أواخر القرن التاسع عشر، وجرى التعبير عن هاتين السمتين بقانونين. وفي عام 1896، لاحظ الفيزيائيّ الألمانيّ ولهلم واين (1864-1928) W. Wien أنّ كثافة إشعاع الجسم الأسود - سطوع الجسم المتوهّج - تكون أكبر ما يمكن عندما يكون بطولٍ موجِيٍّ يتوقف ببساطةٍ على درجة الحرارة. هذه السِّمَةُ مألوفة لدينا في حياتنا اليومية، لأننا نعرف كيف يتوهّج جسمٌ بلونٍ أحمر أوّلاً عند تسخينه، ثم يصبح أبيضَ عندما نرفع درجةَ حرارتِهِ أكثر. ويدلُّل هذا الانتقالُ في اللون على أن قدراً متزايداً من اللّون الأزرق (ذي الطّول الموجيّ الصغيرِ) يُسهم في اللون الذي كان في البدء توهّجاً أحمر (بطولٍ موجيٍّ كبيرٍ)، وذلك عند رفع درجة الحرارة، لذا فإن القيمة العظمى في الكثافة تَنْزَاحُ إلى أطوالٍ موجيّةٍ أقصر. وفي عام 1879، درس الفيزيائيّ النمساويُّ جوزيف ستيفان (1835-1893) J. Stefan سمةً مألوفةً أخرى، وهي الزّيادة الشديدة في الكثافة الإجمالية للضوء الصادر مع ازدياد درجة

الحرارة، وعبّر من العلاقة بين هاتين الزيادتين بقانون كمّيّ[2].

لا يمكن شرح قانون واين ولا قانون ستيفان بلغة الفيزياء التقليدية، برغم الجهود الجبارة التي بذلها منظّرون موهوبون جدًّا. وفي محاضرة ألقاها لورد كلفن في المعهد الملكي بتاريخ 24 نيسان/أبريل عام 1900، أقرّ بالإخفاق في معرفة سبب إشعاع الجسم الأسود، وذلك بوصفه واحداً من غيمتيْنِ سَوْدَاوَيْنِ صغيرتيْن كانتا ظاهرتيْن في أفق الفيزياء الكلاسيكية (الغيمة السوداء الأخرى هي الإخفاق في اكتشاف الحركة عبر الأثير). وقد كبرت غيمتا لورد كلفن لتتحولا إلى عاصفة عاتية بمقدورها اكتساح أفكارنا عن العالم، والطريقة التي ننفِّذُ بها حساباتِنَا، ونفسّر أرصادنا ونفهم البنيةَ العميقةَ للحقيقةِ.

وفي موجةٍ من السخط والغضب، أبدع ماكس بلانك M. Planck (1947-1858) دون قصد النظرية الكموميّة. ففي 19 أكتوبر/تشرين الأول عام 1900، اقترح معادلةً بدتْ أنها تفسّر قانونيْ واين وستيفان، ثم كافح في الأسابيع التالية لتوفير أساسٍ نظريٍّ لمعادلته. وفي محاضرة أُلقيت في الجمعية الفيزيائية الألمانية في 14 كانون الأول/ديسمبر عام 1900، تُعَدُّ الآنَ الميلادَ الرسميَّ للنظريةِ الكموميَّة، قدّمَ بلانك حلاً لها. فقد قام أوّلاً بتصوير الإشعاع على أنه مدفوعٌ باهتزازِ الذرّاتِ والإلكترونات في الجسم الساخن، علماً بأنّ كلَّ تردّدٍ للاهتزازِ يوافقُ وجودَ لونٍ خاصٍّ للضوء في الإشعاع. هكذا كانت النظرة الأوّلية، وقد فعل معاصروه جميعُهم نفسَ الشيء. وقد افترض أيضاً معاصروه أنّ طاقة كلٍّ من هذه المتذبذبات (الهزّازات) oscillators تتغير باستمرار، تماماً مثلما يمكن لنواس (بندول) متأرجح أن يتخذ أيَّ سعةٍ amplitude (كما افترضوا). لكن بلانك تمسّك بوجهة نظرٍ مختلفةٍ جوهريًّا. فقد اقترح أنّ طاقةَ كلِّ متذبذبٍ لا

(2) ينصّ قانون واين على أن حاصل ضرب درجة الحرارة المطلقة في الطّول الموجيّ للإصدار الأعظم ثابت ($A_{max}T$ = constant)؛ وينصّ قانون ستيفان، الذي يسمى أيضاً قانون ستيفان - بولتزمان، على أن الشدة الكلية الصادرة تتناسب طرداً مع القوة الرابعة لدرجة الحرارة المطلقة (الشدة = ثابت× T^4). فإذا أضأنا مصباحاً كهربائياً ورفعنا درجة حرارة الأسلاك من 300 كلفن (درجة حرارة الغرفة) إلى 3000 كلفن، فإن الشدة الصادرة تزداد بعاملٍ قدره 10,000، وهذا هو السبب في أنه يتوهّج بقوةٍ مباشرةً.

يمكن تغييرها إلاّ بخطوات متقطّعة discrete، أي أننا أمام سُلَّمٍ لا أمام طريقٍ منحدرٍ. وتحديداً، اقترح أن طاقةَ متذبذبٍ ذي تردّدٍ معيَّنٍ هي مضاعف صحيح integral، لحاصل ضرب h في التردّد، حيث h ثابت شامل جديد يسمى الآن ثابت بلانك[3]، أي أنه اقترح أن السُّلّمَ للطاقات المسموح بها لأي متذبذبٍ هو 0، 1، 2... ضعف للكمية، المتمثلة بحاصل الضرب h في التردد.

إن قيمة h هي من الصغر بحيث تكون الدرجات في الطاقة لمعظم أشكال الإشعاع الكهرمغناطيسي (وبخاصة الإشعاع الذي نسميه الضوء المرئي) صغيرة جداً إلى درجة لا يمكن فيها كشفها باستثناء كشفها بطرائق جد معقدة. لذا فمن السهل فهم كيف أن الفيزيائيين سيقوا إلى التفكير في أن الطاقات يمكن تغييرها باستمرار. انظر إلى نواس (بندول)، فهل يمكنك رؤية أن سعة نوسانه يمكن تغييرها بطريقة متدرجة stepwise فقط[4]؟ بيد أن التغير المتدرج في الطاقة هو الطريقة الوحيدة التي تمكّننا من تفسير خواص إشعاع الجسم الأسود، وإن التغير المتدرج للطاقة - أي تكميمها quantization - هو الآن حقيقة راسخة.

وقد أسرّ بلانك إلى ابنه أنه ظنّ أنه توصل إلى اكتشاف يمكن مقارنته باكتشاف نيوتن. وقد ظل يسعى فيما تبقّى من عمره - بشيءٍ من اليأس، لكنْ دون أن يحصل على نتائج مهمة - لتفسير التكميم في سياق الفيزياء الكلاسيكية. وثمة درسان يمكننا الإفادة منهما هنا فيما يتعلق بالمنهج العلميّ. أولهما أن الأفكار الثوريّة تكتسب قوةً من مقاومة الهجوم المستمر عليها. وخلافاً لمجالاتٍ أخرى للمحاولات البشرية، حيث يجري اعتماد أفكار مجنونة وتمجيدها دون أن تستحق ذلك، فإن فكرة مجنوعة في العلم عرضةٌ لهجوم متواصل، وبخاصةٍ -

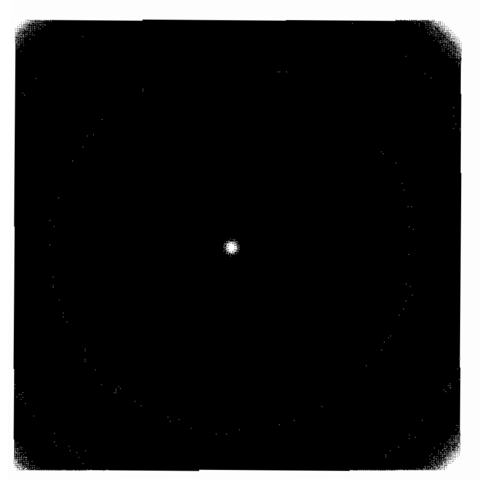
(3) كان بلانك شخصاً لطيفَ المعشِر بكل المقاييس، ولم يَسْعَ إلى نَسْبِ هذا الثابت إلى اسمه، إذ ترك التسمية لآخرين. وفيما يتعلق به، كان الاسم كمّ الفعل quantum of action. وكان قادراً على تقدير قيمته بإيجاد ملاءمةٍ بين معادلاته وبين مراقبات إشعاع الجسم الأسود. القيمة الحديثة لهذا الثابت هي $6.626X\ 10^{14}$ جول.

(4) إذا كان جوابك نعم، فأنت لا تقول الحقيقة. فالدرجات في نواس (بندول) طوله متر واحد، وثقل القرص الذي يوجد في طرفه 100 غرام، وسعة اهتزازه نحو 5 سنتيمترات، مثل نواس في ميقاتية في صندوق طويل، لا يختلف إلا بـ 10^{30} سنتيمتر عن الشاقول، وهذا أصغر من قطر نواة ذرية بخمس عشرة مرتبة في الكبر.

وبخاصةٍ فعلاً - إذا كانت تَستبعدُ نموذجاً راسخاً. الدّرس الثاني هو أن كبار السن من الرجال (ومن النساء أيضاً) ليسوا أفضل المبشّرين بالعلم الراديكالي، لأنهم يكونون مقتنعين بأفكارٍ ترسخت في أعماقهم خلال تربيتهم التقليدية، وهذا يجعلهم ممتعضين من تعلّمهم أشياءَ جديدةٍ عليهم، ومن ثَمّ فإن النماذج الجديدة لا تُقْبَلُ إلاّ بعد رحيل الأجيال السابقة.

ومهما يكن من أمر، فإن فكرة بلانك الثورية والشديدة الحماسة بأن الطاقة تَحْدُثُ على هيئة تكتّلات، وأنها حبيبيّةٌ لا ناعمةٌ، وأنها مثل الرّمل لا مثل الماء، وأنها تُغَيِّرُ فهمنا للواقع، قُوبلتْ بصمتٍ. وفي البداية، اعتُبرتْ حيلةً رياضيةً. ولم تبرزْ الحقيقةُ الفيزيائيةُ لاقتراحِهِ إلاّ عام 1905، عندما قفز المقاتل آينشتاين إلى المسرح، واستلّ سيفه الرياضيَّ ليقضي على تنّينٍ تقليديٍّ آخر.

لِتَعَرُّفِ هذا التنّين، علينا أن نضع أنفسنا في بيئةِ فيزياءِ أواخر القرن التاسع عشر، في عرين التنّين. لقد أصبح كلُّ شخص مقتنعاً في ذلك القرن أن الضوءَ - وبوجه أعمّ، الإشعاع الكهرمغناطيسيّ - تَمَوُّجِيٌّ: إذ إنه ينتشر على شكل موجةٍ. ولم يكن هذا الاعتقاد مقبولاً دوماً. فنيوتُن، الذي دعمه في وقتٍ لاحقٍ لابْلاَسْ، أصرّ على أن الضوء هو دفقٌ من الجسيمات، لكنّ الأدلّةَ التجريبيةَ التي تعاظمتْ خلال القرن التاسع عشر أقنعت الجميع بأنّ الضوءَ موجةٌ. وكان أقوى دليلٍ ظاهرة الانعراج diffraction، الذي كان أوّل من تحدّث عنه المراقبُ المولَعُ بالتفاصيل ليوناردو دافنشي (1452-1519)، والذي كان أول من درسه كميًّا بالتفصيل فيزيائيون أجلاّء مثل هويغنز Huggens وَيونغ Young، وَفرينل Fresnel. كان أحدُ أكثر التأييدات الدرامية للنظرية الموجيّة للضوء التنبؤَ بضرورةِ وجود بقعةٍ ضوئية في مركز ظل كرةٍ أو شاشةٍ دائريةٍ مضاءةٍ من الجانب الآخر (الشكل 7-2). وفي عام 1818، قدّم أوغسطين فرينل (1788-1827) بحثاً في نظرية الانعراج، وذلك في مسابقة جرتْ برعاية الأكاديمية الفرنسية. وقد كان الرياضيّ بواسّون Poisson - وهو أحد أعضاء لجنة الحكم - شديد الانتقاد للنظرية الموجيّة للضوء، واستخلص من نظرية فرينل تنبؤاً منافياً للعقلِ ظاهريًّا مفاده أن البقعة الساطعة يجب أن تظهر خلف عائقٍ دائريٍّ. لكنّ عضواً آخر في



الشكل 7-2. بقعة بواسّون. وفقاً للنظرية الموجية للضوء، فعندما يوضع قرص معتم أمام مصباحٍ، لابدّ من حدوث بقعةٍ بيضاء في مركز الظل. إن ظاهراتٍ انعراجيّةً كهذه هي دليلٌ قاطعٌ على الطبيعةِ الموجيّة للضوء.

اللجنة، فرانسوا أراغو F. Arago، قرّر البحث عن بقعةِ بواسّون الساطعةِ، ووجدها تجريبيًّا. وكانت النتيجةُ أنْ ربح فرينل المسابقة، وأصبحت النظرية الموجية للضوء النموذجَ المقبولَ الذي يبدو عصيًّا على الانتقاد. وهكذا فالتنّين هو الطبيعةُ الموجيّة للضوء.

لقد قضى آينشتاين على التنّين عام 1905، وذلك عندما أثبت أنه يجب، مع ذلك، اعتبار الضوء مؤلّفاً من جسيماتٍ. وقد جرى تدمير آينشتاين للنموذج السابق على مرحلتين. فقد قام أولاً بتحليل الخاصيات الترموديناميّة للإشعاع الكهرمغناطيسي داخل تجويفٍ مسخَّنٍ، وبَيَّنَ أنه كي يكون الإشعاعُ منسجماً مع ملاحظاتِ بلانك يجب أن يكون مؤلفاً من جسيماتٍ لا من أمواجٍ. وقد سُمِّيَتْ هذه الجسيماتُ فوتوناتٍ photons، وذلك بعد عشر سنوات، وسنستعمل هذه التسمية.

بدا أن اقتراح آينشتاين ينسجم مع الإثبات التجريبيّ المباشر على هيئة مفعول كهرضوئي photoelectric effect، حيث يجري طردُ الإلكترونات من سطحِ معدنٍ معرّضٍ لإشعاعٍ فوقِ بنفسجيٍّ. وللمفعول الكهرضوئيّ عدد من السّمات الغريبة بدت أنها خارج قدرة النظرية الموجية على تفسيرها. بَيْدَ أنها فُسِّرتْ مباشرة حين صُوِّر المفعولُ بأنه نتيجةُ تصادمٍ بين إلكترونٍ وفوتونٍ واردٍ. وقد أدّى هذا النموذج إلى وصفٍ كمّيّ صحيحٍ للمفعول الكهرضوئي، وكان

أحدَ الإنجازات التي أسهمتْ في نيل آينشتاين جائزةَ نوبل في الفيزياء عام 1921. وبِتْنَا نعرف الآن كيف نصف المفعول الكهرضوئيّ بدلالةِ الأمواج الكهرمغناطيسية، لذا فإن هذا الدّعمَ الخاصّ لوجود فوتوناتٍ، مع أنه مازال يقدَّمُ في الكتب المقررة (من ضمنها كتابي) بوصفه دعماً عصيًّا على الانتقاد، شيءٌ خاطىء. بيْد أن الفوتونات ليستْ موضوعَ بحثٍ الآن، وثمة عدد وافر من الأدلّة من نوع آخر[5].

إن التوفيق بين النظرة الجديدة غيرِ القابلة للدحض تجريبيًّا القائلة بأن الضوء مؤلفٌ من جسيمات، والنظرة القديمة غير القابلة للدحض تجريبياً بأن الضوء مؤلفٌ من أمواج، كان ـ وهذا شيء يمكن تصوره ـ أمراً بالغ الصعوبة. وظلّ صعباً منذ ذلك الوقت، وسنتطرق إليه في وقت لاحق.

والآن، دخل الفيروسُ الكموميُّ جسمَ الفيزياء الكلاسيكية، وبدأ الانتشار. وقد جرى إسهام آينشتاين الثاني في ترسيخ النظرية الكمومية في *anni mirabili* بين عامي 1905 و1907، الذي حلّ فيه أحجيةً تتعلّق بارتفاع درجة حرارة الموادّ عند تسخينها. الخاصيّة التي دُرِسَتْ كانت السّعَة الحراريّةَ heat capacity لمادّةٍ، وهي مقياسٌ للحرارةِ اللازمةِ لرفع درجة الحرارة بمقدارٍ معطًى[6]. وبالعودة إلى 1819، حين حصلت ثقةٌ مصدرها نتائج تجريبيّة متفرقة، أعلن العالمان الفرنسيان بيير ـ لوي دُولُونْغْ P.-L. Dulong (1838-1785) وَألكسيس ـ تيريز بُوتِي A.-T. Petit (1820-1791)، حين درسا عدد الذرات في عيّنةٍ، أنّ لجميع الموادّ نفسَ السعةِ الحراريةِ. لقد صدّقهما الجميعُ، مع أن هذا غير صحيح وضوحاً. وبعد مرور خمسين سنة على ذلك، توفّر خلالها مزيد من المعطيات، وبدأ الفيزيائيون يقيسون فيها السعات الحرارية في درجاتِ حرارةٍ منخفضةٍ، اتضح تماماً أن قانون دولونغ وَبُوتِي كان خلاصةً

(5) ثمة طرفة تتعلّق بهذا الموضوع، فحواها أنّ آينشتاين حصل على جائزة نوبل مكافأة له على تحليلٍ مزيف لكنّ النتيجة كانت صحيحةً، وأنه لم يُمنح الجائزة مكافأة على أعظم عمل له، وهو نظرية النسبية، التي كانت في ذلك الوقت مثيرة للجدل، لكن ثبتتْ صحتها (في حدود علمنا).

(6) مثلاً، تشير السعةُ الحرارية للماء، التي تساوي 4 جول/درجة كلفن/غرام ـ الحرارة النوعيّةُ للماء ـ إلى أنه يلزم 4 جول من الحرارة لرفع درجة الحرارة 1 غرام واحد من الماء درجة مئوية واحدة.

رديئةً للعالَم، وأنّ السّعات الحرارية جميعَها تقترب من الصفر مع انخفاض درجة الحرارة.

يمكن للفيزياء الكلاسيكية شرح قانون دولونغ وبُوتِي بافتراض أن الحرارة تتولّد من الذرّات خلال تزايد عنف تصادماتها. لذا كان ممّا يثبط همة الفيزياء الكلاسيكية أن تجبَرَ على الاعتراف بأن هذا القانون غير صالحٍ في درجات الحرارة المنخفضة، بل وفي درجة حرارة الغرفة في بعض الحالات. وظلّت المسألة دون حلٍّ إلى أن وجّه آينشتاين عقلَه الاستثنائيَّ لمعالجتها عام 1906. لقد قبل دورَ الذرّات المهتزّة، لكنه افترض، كما فعل بلانك، أنّ الذرات تهتزّ بطاقاتٍ تتزايد متدرّجةً stepwise وليس باستمرار. ففي درجات الحرارة المنخفضة لا يوجد قدر كاف من الطاقة لدفع الذرات إلى الاهتزاز، لذا فإن السّعةَ الحراريّةَ منخفضةٌ جدًّا. وفي درجات الحرارة العالية، يُوجد قدرٌ كافٍ من الطاقة لجعل الذرات مهتزة، وترتفع السعة الحرارية إلى قيمتها الكلاسيكية، وهي التي حدّدها دولونغ وبوتي. كان آينشتاين قادراً على حساب علاقة درجة الحرارة بالسعة الحرارية، وتوصّل إلى توافقٍ جيد مع التجربة. وقد هُذِّبَ نموذجُهُ بعد بعض سنوات من قِبَلِ الفيزيائي الهولندي بيتر دُوباي (1884-1966) P. Debye، ثم إن التهذيبات التي لم تؤثر في الفكرة الأساسيّة أسفرت عن توافقٍ ممتازٍ مع التجربة.

كان لإسهام آينشتاين أهمية كبيرة، لأنه وسّع المفاهيم التي كانت قد برزت من دراسة الإشعاع الكهرمغناطيسي لتضمَّ نظاماً ميكانيكياً صرفاً من الذرّات المهتزة. وقد مهّد الفيروسُ السبيل للانتقال من الإشعاع إلى المادة.

●

وما إن ترسّخ الفيروسُ في المادة، وفي الإشعاع أيضاً، انتشر المرض إلى البنية الكلّيّة للفيزياء الكلاسيكيّة. ثمة تواريخُ وإنجازاتٌ على طول الخطّ الممتد إلى الأمام، بدءاً من عام 1906، وبخاصةٍ النموذجُ التخيّليُّ، وإن كان يتعذّر الدفاعُ

عنه، لذرةِ الهيدروجين، الذي اقترحه عام 1916 الفيزيائيّ الدانمركي الذائعُ الصيت نيلز بور (1962-1885) N. Bohr، الذي ظهر في البداية وكأنه يبغي التحقُّقَ من إمكانِ تطبيق المفاهيم الكمومية على نظم الجسيمات. بيد أن التاريخ الحاسم لأهدافنا الحاليّة هو عام 1923، عندما وصل الفيروسُ إلى قلب المادّة. وحلّ مشكلة مفهوم الجسيم.

ومع أن العلماء ـ الذين كانوا جادّين في مفهومهم مثلما كان نيوتن سابقاً ـ اعتمدوا الفكرةَ التي مفادها أنّ الضوءَ مؤلّفٌ من جسيماتٍ، فإن تقديم الفوتونات لم يكن مفاجأةً تامةً، إذ لم يعتنقْ أيُّ عالِمٍ وقورٍ ـ باستثناء قلة من قدماء اليونانيين ـ الفكرة التي مؤدّاها أنّ المادة شبيهةٌ بالموجة. ومع ذلك، فخلال اضطراب المجتمع في كثيرٍ من الأمور في العشرينيّات من القرن الماضي، فإن هذه الفكرة بالضبط سادتْ وأصبح لها جذور. المبدعُ الحقيقيُّ لها هو الأمير لوي دو بْرُويل (1987-1892) L. de Broglie، وهو سليل عائلةٍ رفعها إلى طبقة النبلاء لويس الرابع عشر.

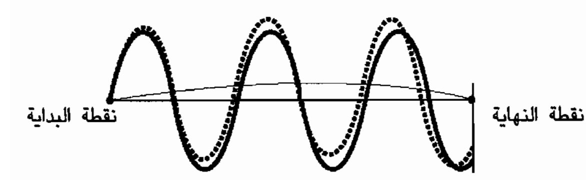
كان تقديم دُو بْرُويل لفكرته الثوريّة مستنداً إلى معرفته للشبه بين انتشار الضوء وانتشار الجسيمات. كانت حججه نسبويّةً relativistic، لكننا نستطيع بلوغ جوهر الحجج التي قدّمها بمعزلٍ عن ذلك التعقيد. إن السّمة المكزيّة للبصريات (الضوئيات) الهندسية geometrical optics ـ وهي ذلك القسم من علم الضوء (البصريات) الذي يرسم مسارات الأشعة الضوئية على شكل خطوط مستقيمة عندما تنعكس على المرايا وتنعرج عبر العدسات ـ هي أن الأشعة الضوئية تنتشر على طول مساراتٍ بحيث يكون زمنُ رحلتها من المنبع إلى هدفها النهائي أصغريًّا. وهذه الدعوى هي ما يُسمَّى مبدأ الزمن الأصغر principle of least time الذي اقترحه عام 1657 المبدعُ والهاوي الفرنسيُّ، والرياضيُّ المتميز أيضاً، بيير فيرما (1665-1601) P. Fermat، باعتباره تعميماً لملاحظةٍ ذكرها Hero of Alexandrio عام 125 ق. م. تقريباً في مؤلَّفِهِ *Catoprics*. وثمة اسمٌ أدقّ هو مبدأ الزمن المستقرّ principle of stationary time: وببساطة، تعني العبارة غير المألوفة «الزمن المستقر» أنّ الزمن اللازم لقطع مسارٍ قد يكون أصغرياً، أو، في

حالاتٍ معيّنةٍ، أعظميًّا. سنلتزم في مناقشتنا بمسارات الزمن الأصغر، لكن النتائج يمكن تعميمها بسهولةٍ على الزمن الأعظم أيضاً. والأحجية التي يجب أن تنشأَ مباشرة هي التالية: كيف يعرفُ الضوءُ، سلفاً، المسارَ الذي يُقْطَعُ في رحلةٍ زمنها أصغري؟ فإذا بدأ انتشاره على طول مسار خاطىء، فهل يمكن أن يكون من الأفضل اقتصاداً للزمن أن يواصل رحلته من أن يعود القهقرى إلى منبعه، والبدء من جديد؟

وهنا تتدخل النظرية الموجية للضوء لتحلّ المسألة بطريقةٍ بالغةِ الأناقةِ. لنفترضْ أننا نفكّر في مسار كيفيٍّ بين نقطتين مثبتتيْن، ونتخيّل موجةً تشقّ طريقَهَا على طول هذا المسار (الشكل 7-3). لنفكّرْ بعدئذٍ في مساراتٍ واقعةٍ قريباً جدًّا من المسار الأول، مع وجود موجات تسير عليها أيضاً. وفي النقطة النهاية التي تصل إليها المساراتُ، فإن ذُرَى وأغْوارَ (بطون) الموجات يُفني بعضُها بعضاً: ويسمَّى هذا الإفناء المتبادَلُ تداخلاً هدّاماً destructive interference. التداخل سمةٌ مميّزةٌ لحركةِ الموجة: إنه يُرَى على صفحةِ ماءٍ حيث تتطابق ذروة موجةٍ مع غور موجة أخرى، وعندئذٍ تُلغَى انزياحاتُ الماء. ومع ذلك، يوجد مسارٌ واحد له جيرانٌ مواقعُ ذُرَاهُمْ مختلفةٌ قليلاً، ومن ثمّ يعزّزُ بعضُها بعضاً، بدلاً من تدمير بعضها بعضاً: يُسمّى هذا التعزيز المتبادَل تداخلاً بنّاءً constructive interference. يُشَاهَد هذا الأثر أيضاً في تموجات الماء حيث تتطابق الذُّرَى ويتعزز انزياح الماء. إن المسارات التي تتداخل بطريقةٍ بنّاءةٍ هي تلك القريبة جدًّا من أن تكون خطًّا مستقيماً ـ عموماً، مسارات الزمن الأصغر ـ بين المنبع والغاية المقصودة.

سنبحث الآن في جوهر هذه الحجج. الضوء لا يعرف سلفاً، وليس بحاجةٍ إلى أن يعرف، المسارَ الذي سيكون مسار الزمن الأصغر: إنه يجرّب جميع المسارات، لكن المسارات القريبة جدًّا من مسار الزمن الأصغر هي التي لا يلغي بعضها بعضاً. ويصبح التداخلان الهدَّامُ والبنّاءُ أشدّ صرامةً بكثير عندما تكون الأطوال الموجيّة للضوء أقصر. هذا ولا يبقى سوى الخطوط المستقيمة هندسيًّا في نهاية أطوال موجية غير منتهية القصر، وهي النهاية التي تصبح فيها

نقطة النهاية نقطة البداية



الشكل 7-3. في الشكل العلوي، نرى مساراً منحنياً بين نقطتين مثبتتيْن، ومساراً منحنياً قريباً منه. وقد رسمنا على كلّ مسارٍ موجةً بنفس الطّول الموجيّ. ومع أنهما تنطلقان بنفس السعة، فعندما تصلان إلى النقطة النهائية تصبح السعتان مختلفتين جدًّا. وإذا تخيلنا حزمة كاملة من الأمواج تسير على مسارات قريب بعضها من بعض، فيتعيّن علينا أن نكون قادرين على فهم أن السعاتِ في النقاط النهائية مختلفةٌ جداً، وأنها تتداخل بطريقة هدّامة، وهذا يجعل السعة الكلية صفراً. وفي الشكل السفلي نرى الشيءَ نفسه لمسارٍ على شكل خط مستقيم ولمسارٍ آخر قريب منه. في هذه الحالة، يكون لكلّ الأمواج الواصلة إلى نقطة النهاية سعةٌ قريبٌ جداً بعضها من بعض، ولا تتداخل بطريقةٍ هدّامةٍ. نستخلص من هذا أنه عند إعطاء كامل الحرّيّة للسير وفق أي مسار، فإن الطرق التي تظلّ موجودةً هي تلك القريبة من الخط المستقيم.

البصرياتُ optics (الموجيّةُ) الفيزيائيةُ بصرياتٍ هندسيةً. وقد أسفرت الحرية الكاملة للفعل عن قاعدة واضحة، أي أن أفضل نوع من التفسير العلمي، حيث يبرز ذئبُ الافتقارِ الكلّي إلى القيود، على شكل قطيعٍ من الغنم ذي سلوك منهجي، وتبرز الفوضى على شكل نظام، وتبرز الحرية على شكل مؤسّسةٍ للتحكّم.

لِنُبْقِ هذا التفسير في أذهاننا، ولننتقل إلى النظر في الجسيمات. يُعَيَّنُ مسارُ جسيمٍ، وفقاً للميكانيك التقليدي، بواسطة القوى المؤثرة فيه في كل لحظة (كما رأينا في الفصل 3). بيد أنه في حال انتشار الموجات، يمكننا تقديم هذا الوصف في صيغةٍ تُعنَى بالمسار الكلي. وفي عام 1744، أعلن الرياضي والفلكي

الفرنسي بيي - لوي مورو دو موبرتوي (1759- P. L. M. de Maupertuis 1698) أنّ المسار الذي يسلكه جسيمٌ يتعيّن بحيث يكونُ مقدار مرتبط بالمسار، أسماه الفعل action، أصغريًّا. وقد دُفع موبرتوي إلى مبدئه الذي يسمّى مبدأ الفعل الأصغر انطلاقاً من اعتباراتٍ لاهوتيّةٍ أكثر منها فيزيائية، لأنه حاجَّ في بحث له بعنوان مقالة في الكوسمولوجيا (1759) Essai de cosmologie، في أنّ كمالَ اللَّهِ لا ينسجمُ مع أيّ شيء لا يكون مفرطاً في بساطته ولا يتطلب بذلَ أقلَّ قدرٍ ممكنٍ من الجهد. ومن سوء حظ هذه الرؤية أن النصّ الحديث لمبدأ الفعل الأصغر يقرّ بأنّ الجسيم، في بعض الحالات، يسلك طريقاً يتطلب أكبر قدرٍ من الفعل. لذا ثمة اسمٌ أفضل للمبدأ هو مبدأ الفعل المستقر principle of stationary action. وبغية البساطة، فإننا سنتمسّك بمسارات الفعل الأصغر.

كان تعريف موبرتوي «للفعل» action غامضاً، ويتغيّر وفقاً للمسألة التي يعالجها؛ ومع ذلك، فقد كان البذرةَ لفكرةٍ صحيحةٍ، وجرى التعبير عنه في نفس الوقت تقريباً بصيغةٍ دقيقةٍ رياضيًّا، لكنْ مقيدةٍ، من قِبَل الرياضي السويسري ليونارد أولر (1783-1707) L. Euler، ثم وُضِعَت له صيغة نهائية قرابة عام 1760 من قِبَلِ جوزيف لوي لاغرانج (1813-1736) J. L. Lagrange. غير أنّ هذه التعقيداتِ التاريخيّةَ يجب تجاوزها: النقطة الأساسية هي وجود كميةٍ معرَّفَةٍ جيّداً تسمى الفعل - فكّر في الكلمة بأنها قريبةٌ «للجهد» - وجسيمٍ يختار طريقاً يوافق بذل الفعل الأصغر، أو الجهد الأصغر. والأحجية التي يجب أنْ نقابلَهَا مباشرةً - وهنا أعيدُ صوغَ كلماتي السابقة - هي كيف يَعْرِفُ الجسيمُ، سلفاً، المسارَ الذي ينتج منه رحلةُ فعلٍ أصغرَ؟ وإذا بدأ بسلوك المسار الخطأ، فهل يمكن ألاّ ينتج منه رحلة أكثر اقتصاداً للفعل - أو الجهد - ليتابعَ هذه الرحلةَ بدلاً من أن يعود أدراجه إلى نقطة الأصل للبدء بالرّحلةِ ثانيةً؟

لقد ذُهِلَ دو بْرُويل من الشَّبَهِ بين القوانينِ الأساسيةِ للبصريّاتِ والقوانينِ الأساسيةِ لديناميك الجسيمات حين التعبير عنهما بمبدأ الزمن الأصغر ومبدأ الفعل الأصغر على التوالي. ورأى أن مسألة الجسيم، الذي

يبدو بأنه يعرف قبل انطلاقه المسارَ الذي ينتج عنه فعلٌ أصغر، يُمكن أن تُحَلَّ بنفس الطريقة التي تُسْتَعْمَلُ للضوء، شريطة أن تكون الموجةُ مرتبطة بالجسيم. عندئذٍ نحصل على قانونٍ هو: الأمواج المرتبطة بالجسيم ستستكشِفُ كلَّ المسارات بين المنبع والهدف، وإن تلك، فقط، التي توافق خطًّا مستقيماً (إذا لم يوجد قوًى تعمل، وتوافقُ مساراتٍ أعمَّ إذا كانت القوى - مماثلات المرايا والعدسات - موجودة) ستتعرّض إلى تداخلٍ بَنَّاءٍ وتنجو من الفناء بتأثير جيرانها. وسيصبح هذا الفناء صارماً مع نقصان الطول الموجيّ لهذه «الأمواج المادية»، وفي نهاية الأطوال الموجية اللامتناهية في قصدِها، سنستعيد المساراتِ المعرّفة جيّداً هندسيًّا عبر الفضاء. وبعبارةٍ أخرى، يجب أن يبرز الميكانيك النيوتنيّ، الذي تسلك فيه الجسيمات مساراتٍ دقيقةً.

وبتفحّص هذا الشبه، استطاع دو برويل استنتاجَ عبارةٍ للطول الموجيّ لموجاته المادية هي:

$$\text{طول الموجة} = \frac{h}{\text{الاندفاع الخطي}}$$

حيث h ثابت بلانك، والاندفاع الخطي (كمية الحركة) momentum لجسيم هو حاصل ضرب كتلته في سرعته (كما رأينا في الفصل 3). وهكذا فإن ثابت بلانك (تَذَكَّرْ أنّ بلانك سمَّى هذا الثابت «كمّ الفعل») يدخُلُ في وصف ديناميك المادة بمستوًى جدٍّ عميقٍ، ويمسُّ قلب الحركة. لاحظ أن الكتلة واردةٌ في مخرج (مقام) هذه العبارة عن طريق إسهامها في الاندفاع الخطّيّ، لذا يُتَوقَّعُ للكتلِ الكبيرةِ (الكرات، الناس، الكواكب) أن يكون لها أطوالٌ موجيَّةٌ متزايدةُ القِصَرِ. إن طولكَ الموجيَّ عندما تكونُ متحركاً بسرعةِ مترٍ واحدٍ في الثانية، مثلاً، يساوي 1×10^{-35} متر تقريباً فقط، لذا فمن الممكن التعامل مع حركتكَ وفق ميكانيك نيوتن، ويمكنك السفر دون خوف يُنْكَرُ من أن تحيد في طريقك وتنتهي رحلتُك في بَادُوا

بدلاً من بيزا[7]. وليس من المفاجىء جدًّا أن الأمواجَ الموجيّة القصيرةَ جدًّا لا تُلاحَظ، وأنّ الميكانيكَ النيوتنيَّ كان ناجحاً جدًّا عندما طُبِّقَ على الأجسام «الماكروسكوبية» (العيانية) المرئية. لكنْ حين النظر في الإلكترونات، فنحن ندخل عالماً جديداً لأنها خفيفة الوزن جدًّا، ومن ثم فإن اندفاعاتِهَا الخطية صغيرةٌ، لذا فإن أطوالَهَا الموجيّة كبيرةٌ. الطولُ الموجيّ لإلكترونٍ في ذرّةٍ هو من مرتبة قطر الذرّة، ومن ثَمَّ فإن تطبيقَ الميكانيكِ النيوتنيِّ على الإلكترونات يؤدي إلى تقريبٍ غيرِ مقبولٍ.

لقد استحق دو برويل جائزةَ نوبل عام 1929 بجدارة، وذلك «لاكتشافه الطبيعة الموجيّة للإلكترون». ومع ذلك، فإن لجنة مَنْحِ الجائزةِ لم تكنْ مُحِقَّةً تماماً في تقييمها: فَتَعَرُّفُ دو برويل للطبيعةِ الموجيّةِ للإلكترون ينطبق على جميع الجسيمات، لا على الإلكترونات وحدها. الإلكترونات هي أخفّ الجسيمات، لذا فإن اقتراحه واضحٌ جدًّا في حال الإلكترونات، لكنْ لا وجود لجسيمٍ أو مجموعةٍ من الجسيمات (من ضمنها الكرات، والناس، والكواكب) ليس لها، من وجهة المبدأ، سمةٌ موجيّة مرتبطة بها. وقد أُثبتَ وجودُ هذه السِّمَةِ الموجيّةِ تجريبيًّا بإظهار أن الإلكتروناتِ تمتلك أشهر خاصيّةٍ مميّزةٍ للأمواج، وهي الانعراج. وفي عام 1927 مُنِحَ الأمريكيُّ كلنتون دافيسون C. Davisson (1958-1881) جزءاً من جائزة نوبل لأنه أثبت أن الإلكترونات تنعرج بواسطة بلورةٍ وحيدةٍ من النيكل، ثم إن جورج طومسون G. Thompson (1975-1892)، الذي كان يعمل في أبردين Aberdeen، حصل على حصته من تلك الجائزة لأنه أثبت أنها تنعرج عند تمريرها عبر غشاءٍ رقيقٍ. ومنذ ذلك الوقت، انعرجت جميع الجزيئات. وإنّها لسمةٌ لافتةٌ للنظرِ أن يَحْصَلَ G. P. Thomson على جائزته لأنه بيّن أن الإلكترونَ موجةٌ، في حين مُنِحَ والدُهُ J. J. Thomson الجائزةَ لأنه أثبت أن الإلكترون جسيم.

(7) عندما تتوقف، فإن أول رد فعل قد يحدث هو أن يصبحَ طولُكَ الموجيُّ فجأة غير منتهٍ، وأنك ستنتشر عبر الكون، وهذا مخالفٌ للفطرة السليمة. لكنْ يبدو أنك تتوقف فقط؛ وفي الحقيقة فإن جسمك يستمرّ في الحركة باتجاهاتٍ مختلفةٍ خلال اهتزازه، وإنْ كنتَ لا تلاحظُ ذلك.

وصلْنا الآن إلى المرحلة التي كانت فيها الثورةُ تلوح في الأفق، لكنها لم تكن واضحة ولا مفهومة تماماً. حتى دو برويل لم يفهمْ حقًّا ما الذي كان يعنيه «بالأمواج المادية». ومع ذلك، فما ترسّخ كان ثنائيةَ duality المادّةِ والإشعاعِ، وامتلاكهما سماتٍ مميّزةً لكلٍّ من الأمواج والجسيمات. إن الضوء، الذي طالما عُرف أنه يشبه الأمواج، أُثبِتَ أن له وجهاً آخر، وأنه يتصرف مثل الجسيمات، والمادة التي طالما عُرِفَتْ أنها دقائقيةٌ particulate، أُثبِتَ أن لها وجهاً ثانياً، وأنها تتصرف كما لو كانت موجة. ومرة أخرى، تلمعُ في ذهننا صورةُ المكعّبِ (الشكل 6-12)، الذي يبدو لنا من جهةٍ مربّعاً، ومن جهةٍ أخرى مسدَّساً.

إن الفيروسَ الذي دمّر الآن معظم المفاهيم الفيزيائية السائدة، بلغ ذروة قوته عام 1926 عندما بدأ حلُّ الطبيعةِ الموجية للمادةِ، التي اقترحها دو برويل. وقد صار واضحاً تدريجياً أن مصطلحنا «فيروس» غير ملائم، لأن الإزالة التدريجية لغبار الفيزياء الكلاسيكية الكثيف أماطت اللثام عن عالَمٍ أكثر بساطةً ونظافةً وفهماً. هذا وإن كبار السّنّ، الذين رأوْا في الجديد شيئاً غيرَ قابلٍ للتصديق، لم يتوصّلوا إلى تفاهمٍ مع البساطةِ الجديدةِ، ونتيجةً لذلك، صاروا يضلّلون صغار السنّ. ولي وطيد الأمل في كشف النقاب في هذا الفصل، للعقول الشابة والمتفتحة، عن البساطة التي وفرها الميكانيك الكموميّ لفهمنا العالَمَ.

والآن، سنسلّط الضوءَ المسخّرَ لكشف الإنجازات على عملاقيْن يعملان في النظرية الكمومية هما: الألمانيّ المحاط بالألغاز وِيْرنَرْ هايزنبرغ W. Heisenberg (1901-1976)، والنمساويّ الرومانسيّ إِيرْوِينْ شرودينغر E. Schrödinger (1887-1961). لقد صاغا معاً معادلات تسمح لنا بحساب الخاصّيّاتِ الديناميّةِ للجسيماتِ، التي حلّتْ محلّ قوانين نيوتن في الحركة. وقد صاغ الأوّلُ ما يُسمّى ميكانيكَ المصفوفاتِ matrix mechanics، والثاني الميكانيكَ الموجيّ wave mechanics، وقد بدا وكأن هاتين الصياغتين تختلفان تماماً إحداهما عن الأخرى، ثم إن فلسفتيْهما مختلفتان أيضاً. لكنْ سرعان ما تبيَّن أن الصياغتيْن متطابقتان رياضيًّا، لذا غدت الفلسفتان المتعارضتان مسألةَ خيارٍ شخصيٍّ. للرياضياتِ مثْلُ هذه السِّمةِ المتقلِّبة، وهي تفرض نفسها على العالَمِ الماديِّ

بطرائقَ مختلفةٍ، لكنْ متكافئةٍ، لذا يتعيّن علينا دوماً التزامُ جانب الحذر عند ازدراء صياغةِ شخصٍ آخر، إذ قد يتبيّن أنّ الصياغتينْ متكافئتان. وعموماً، يُسمّى الآن مزيج الميكانيك الموجيّ وميكانيك المصفوفات الميكانيك الكموميَّ quantum mechanics، وسنستعملُ هذا المصطلحَ من الآن فصاعداً.

ليس هذا هو المكان المناسب للدخول في تفصيلاتِ الميكانيكِ الكموميِّ، أو سَرْدِ محتوياتِهِ مرتَّبَةً زمنيًّا. وبدلاً من ذلك، فإنني سأمزج الصّياغتينْ وسأقارن بينهما، وذلك لإطلاعكَ على جوهر الميكانيك الكموميّ دون إقحامكَ في التفاصيل. يجب عليكَ مواجهةُ عددٍ من الأفكارِ الغريبةِ والمشوِّشةِ، لكنني سأقودك عبرها بتأنٍّ ورَويَّةٍ.

إحدى أشهر السِّمات وأكثرها إثارة للجدل، التي تطبع الميكانيك الكمومي، هي مبدأ الارتياب uncertainty principle، الذي صاغه هايزنبرغ عام 1927. فقد شرع في عمل يرمي إلى تبيان - وفي ذهنه علاقة دو بريل بين طول الموجة والاندفاع الخطّيّ - أنّ ثمة تقييداتٍ نتعرّض لها عندما نريد معرفة الجسيم. وعلى سبيل المثال، إذا أردنا تحديد موقع جسيمٍ باستعمال مجهرٍ (مكروسكوبٍ)، فعلينا استعمال فوتونٍ واحدٍ على الأقلّ لرصد الجسيم، وأنه إذا تطلّبنا مزيداً من الدقة في تحديد الموقع، فيجب أن يكون للفوتون الذي نستعمله طول موجيّ أقصر. ومجمل القول، لا يمكننا تحديد موقع أي شيء بدقة أعلى إلا باختيارٍ مناسب لطول موجة الإشعاع الذي نستعمله لمعرفة موقع الشيء: ومن ثم، فباستعمال الضوء المرئي، لا يمكننا تحديد موقع أي شيء قطره أقل من نحو 5 في العشرة آلاف من المليمتر. فالصوت - الذي تكون أطواله الموجية قريبة من المتر، لا يسمح لنا بتحديد موقعٍ مصدره بدقة أعلى من قرابة متر، وهذا هو السبب الذي يجبر الخفافيش على استعمال أصواتٍ لها تردّداتٍ عاليةٍ جدًّا، أي أصواتٍ أطوالها الموجية قصيرة، كي تحدّد مواقعها بصدى الأصوات التي تصدرها[8]، لكنْ ثمة ثمنٌ لابد من دفعه نتيجةَ استعمالِ إشعاعٍ كهرمغناطيسيٍّ ذي طولٍ

(8) في الأسلوب الذي يستعمله الخفاش للبحث، يستعمل إشارة قدرها 35 كيلوهرتز، وهذا يوافق طولاً موجيًّا قدره 1 سنتيمتر.

موجيٍّ صغير لتحديد موقع جسيم. فعندما يصدم فوتونٌ جسيماً، فإنه يستولي على جزءٍ من اندفاعه الخطي، ويمكننا أن نستخلص من علاقة دُو بْرُويل أن كِبَرَ الاندفاعِ الخطّيّ المنقولِ إلى الفوتونِ يزداد عند تقصير طولِ موجة الفوتون. وهكذا فإننا عندما نقوم بزيادة دقة معرفتنا لموقع الجسيم، فإننا نضعف معرفتنا باندفاعه الخطيّ. وبتحليل هذه المسألة بالتفصيل، تمكّن هايزنبرغ من التوصل إلى النتيجة الشهيرة وهي أن

الارتياب في الموقع × الارتياب في الاندفاع الخطي لا يقل عن h.

علينا أن نَعُدَّ مبدأ هايزنبرغ في الارتياب نتيجةً تجريبية، مع أن التجربة المجهرية التي وصنفاها لم تُجْرَ على نحوٍ بَيِّنٍ وصريح: فقد صاغ هايزنبرغ مبدأ الارتياب بوصفه خلاصةً لتحليلٍ دقيقٍ لترتيباتٍ تجريبيةٍ في ضوء المعرفة الحاليّة. وبالطبع، فقد تعطي التجربةُ الفعليّةُ نتيجةً مختلفةً جدًّا عمّا نتنبأ به لهذه التجارب الذهنية، والتي هي، عموماً، جوهرُ دورِ التجربة في المنهج العلميّ. لكنْ، إذا كان فهمنا صحيحاً، فإنْ كان العِلْمُ الحاليُّ قابلاً للتطبيق، كانت نتيجةُ هايزنبرغ صحيحةً.

إن الفيزياء الكلاسيكية، التي كانت جاهلةً أساساً بالاندفاع الخطي لفوتونٍ، لأنها لم تكن تعرف شيئاً عن الفوتونات، ولا عن ثابت بلانك، مبنيّةٌ على النظرة التي ترى أن الموقعَ والاندفاعَ الخطيّ يمكن معرفتهما في آنٍ واحدٍ بدقةٍ كيفيةٍ. والسؤالُ الذي يبرز الآن هو: كيف يمكن لمبدأ الارتياب ـ الذي يجب عَدُّهُ وصفاً أساسياً للطبيعة، وابتعاداً شديداً عن الفيزياء الكلاسيكية ـ أن يُدْمَجَ في الوصف الرياضيّ للحركة؟ في الفيزياء الكلاسيكية، نفكّر في أنّ موقعَ جسيمٍ واندفاعَه الخطيَّ يتغيّران مع الزمن، وأنّ معرفةَ كلٍّ منهما في كل لحظةٍ توفر لنا مساراً trajectory محدَّداً تماماً للجسيم.

ويمكننا السّعي للحصول على الأجوبة كما يلي: يجب أن يكون من الواضح أن بوسعنا، في أي لحظةٍ، كتابة:

الموقع × الاندفاع الخطي − الاندفاع الخطي × الموقع = 0

فمثلاً، إذا بيّن القياسُ أن الموقعَ يبعدُ وحدتيْن عن نقطةٍ معينةٍ، وكان قياس الاندفاع الخطّيّ يساوي 3 وحدات، فإن الحدّ الأيمن الأول يعطي 2 x 3، أي 6 وحدات، والثاني يعطي 3 x 2x، أي 6 وحدات، والفرق بينهما صفر وضوحاً. من الواضح أن إلغاء حدٍّ حدًّا آخر ممكنٌ، لكنْ في الميكانيك الكموميّ، فهذا غالباً ما يكون خاطئاً. ومجمل القول، لما كنا لا نتمكّن من معرفة الموقع والاندفاع في آن واحد، فلا يمكننا أن نكون متوثقين من أن كلَّ حدٍّ يساوي 6 وحدات بالضبط، لذا فمن الممكن أن يكون الحدّ الأول في هذه العبارة مختلفاً عن الحد الثاني بمقدارٍ من مرتبةِ ثابتِ بلانك. كان الإنجازُ العظيمُ لهايزنبرغ إثباتَهُ أنّ علاقة الارتياب بين الموقع والاندفاع الخطي، وهي دعوى عن العالَم جرى التحقّق منها تجريبيًّا، لا يمكن الحصولُ عليها إلاّ إذا كان الحدُّ الأيمنُ من العبارة السابقة غيرَ صفريٍّ، بل هو ثابت بلانك h[9]:

الموقع × الاندفاع الخطي − الاندفاع الخطي × الموقع = h

وقد افترض الفيزيائيون التقليديون أن الحدّ الأيسر من المعادلة يجب أن يكون صفراً، وعلى هذا الأساس شيّدوا صَرْحَ الفيزياء الكلاسيكية. نحن نعلم الآن أن الحدّ الأيسر ليس صفراً، لكنه صغير جدًّا، وهذا يجعلنا لا نعجب من افتراضِهِ مساوياً للصفر من قِبَلِ الفيزيائيين التقليديين. ولحقيقة كَوْنِ الحدِّ الأيسر مغايراً للصفر تداعياتٌ بعيدةُ الأثر، وهي السمة التي جعلت الفيزياء الكلاسيكية تتبعثر ثم تسقط.

وجد هايزنبرغ بمساعدة زميليْه مَاكْسْ بُورْنْ (1970-1882) M. Born وبَاسْكُوَالْ جُورْدَانْ (1980-1902) P. Jordan طريقة إدخال الحدّ الأيسر من المساواة الأخيرة، المغاير للصفر، إلى الميكانيك الكموميّ. وفي تلك الأثناء كان شرودينغر وقد وجد طريقةً أخرى. أنت ستتذكر أن دُو بْرُويل اقترح وجودَ موجةٍ مادية «مرتبطة» بطريقةٍ ما بالجسيم، وأنه بعد أخذه التداخلَ في الحسبان، فإن

(9) نحن نبسّط الأشياء قليلاً: فالقيمة الدّقيقة في الحدّ الأيمن من المساواة ليست h، إنّما هي $ih/2\pi$، حيث i الجذر التربيعي للعدد السالب 1-.

الموجة التي بقيت موجودةً انتشرت على طول مسار الفعل الأصغر. من السهولة بمكان العثور على قواعد لإخبار الموجة كيف تتلمّس طريقَها عبر الفضاء للعثور على هذا المسار الذي يبقيها موجودةً. تلك القواعدُ هي محتوَى معادلة شرودينغر[10]. تبيّن هذه المعادلةُ الشهيرةُ كيف تتغير الموجةُ الماديَّةُ من نقطةٍ إلى أخرى، ويتبيَّن أنه لصوغها علينا الإفادة من نفس المعادلة السابقة التي تتضمن الموقع والاندفاع، مثلما كان على هايزنبرغ الإفادة منها في الحوار مع أتباع الفيزياء الكلاسيكية. إن الدور المركزي لهذه العلاقة في كلتا الصياغتين هو السبب الرئيسي الذي جعل طريقتي هايزنبرغ وشرورينغر متكافئين رياضيًّا.

عندما نحلّ معادلة شرودينغر، نحصل على العبارات الرياضية لأشكال الأمواج المادية. لم يعد يُسْتَعْمَلُ مصطلحُ «الموجة المادية»، ولا تفسير دو برويل له. المصطلح الحديث البديل عن «الموجة المادية» هو الدَّالَّةُ المُوجِيَّةُ wavefunction (وهو مصطلحٌ قابلناه في الفصل 5)، وسنستعمل هذه التسميةَ من الآن فصاعداً.

ليست الدّوالُّ الموجيّةُ مجرّدَ صيغٍ رياضيّةٍ خاليةٍ من المعنى: إذْ يمكننا تعقّبُ التفسير الحاليّ لأهميتها الفيزيائية بالعودة إلى اقتراحٍ قدّمه ماكس بورن. لاحظ ماكس بورن أنه، في المصطلحات الكلاسيكية (الموجية)، تكون شدةُ الضوءِ متناسبةً طرديًّا مع احتمال العثور على فوتونٍ موجودٍ في منطقةٍ من الفضاء. وإذا ضاعفنا سعة موجة ضوئية مرتينْ، فإن شدتها تتضاعف أربع مرات (حزمة الضوء أسطع أربع مرات)، ويزداد احتمال عثورنا على فوتونٍ في منطقة معينةٍ من الفضاء أربع مرات. اقترح بُورْن بعد ذلك أنّ من الطبيعي توسيعَ هذه العلاقة إلى الدوال الموجية، وإلى تفسير مربع الدالة الموجية لجسيم في نقطة ما بأنه يعطي الاحتمالَ للعثور على الجسيم هناك، وهكذا فإذا كان لدالة موجيّةٍ

(10) نورد هنا أنّ معادلة شرودينغر (أعط أو خذ بضعة عوامل للعدد m π، ويتحرك في منطقة الطاقة الكامنة فيها هي V، تبدو بالصيغة التالية:

$$h^2/m = (V-E)$$

حيث E طاقة الجسيم، الدالة الموجية التي نسعى لإيجادها، تقوسها.

سعةٌ في موقع أكبر مرتين من سعتها في موقع آخر، فإن احتمال العثور على الجسيم في الموقع الأول أربعة أمثال احتمال العثور عليه في الموقع الثاني. يمكننا الاستنتاج أنه حيث يكون مربع دالةٍ موجيّةٍ كبيراً، فثمة احتمالٌ كبيرٌ للعثور على جسيمٍ هناك، وحيث يكون صغيراً، فثمة احتمالٌ صغيرٌ للعثور على جسيم هناك (الشكل 7-4). لاحظ أنّ هذا التفسيرَ يعني أن للمناطقِ التي يكون فيها لدالةٍ موجيةٍ قيمةٌ سالبةٌ - وهذا يحصل في قعرٍ لموجةٍ مائيةٍ - نفسَ الأهميةِ التي تحظى بها المناطقُ التي يكون فيها للدّالة قيمةٌ موجبةٌ، لأنه عندما نربّع الدالةَ الموجيةَ، فإن أيّ منطقة سالبة تصبح موجبة أيضاً.

دالة موجية

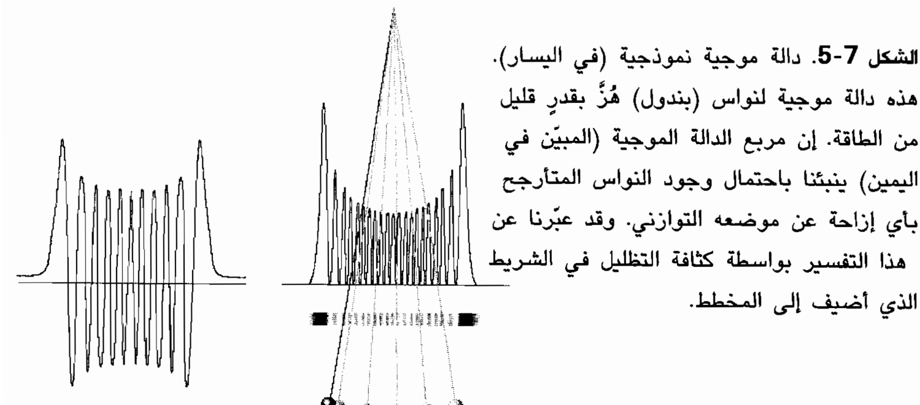
مربع الدالة الموجية

توزع الاحتمالات

الشكل 7-4. تفسير بُورْنْ Born للدّالة الموجيّة. الخطّ الغامق اللون هو دالة موجية كيفية: لاحظ أنها تجتاز الصفر في عدة نقاط (تسمى عُقَداً nodes)، لذا فلها مناطقٌ السِّعَاتُ فيها إيجابيةٌ وسلبيةٌ. وعندما نربّع الدّالَةَ الموجيّةَ، فنحن نحصل على الخط المنقّط الفاتح اللون، الذي هو غير سالب أينما كان، لكنه صفرٌ حيث تكون الدالةُ الموجيّةُ صفراً. ووفقاً لتفسير بورن، فإن هذا المنحني يوفر لنا احتمال العثور على جسيمٍ في كلّ نقطةٍ من الفضاء. وقد أشرنا إلى هذا التفسير بواسطة كثافة التظليل في الشريط السفليّ الذي أضيف إلى المخطط.

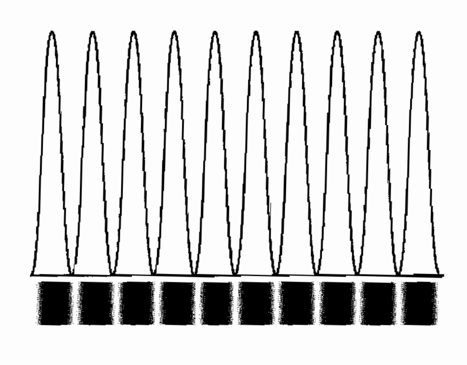
قد يبدو مفهومُ الدّالة الموجية مراوغاً إلى حدٍّ ما برغم تفسير بُورْنْ. سأحاول في الفقرات القليلة التالية توليدَ انطباعٍ لديكم عمّا تبدو عليه بعضُ هذه الدّوالّ. سأبيّن أيضاً كيف يمكنكَ حلُّ معادلة شرودينغر ذهنياً دون أن تراها، ودون أن يكون لديك أدنى فكرةٍ عمّا يعنيه حلُّ معادلةٍ تفاضليةٍ جزئية من المرتبة الثانية.

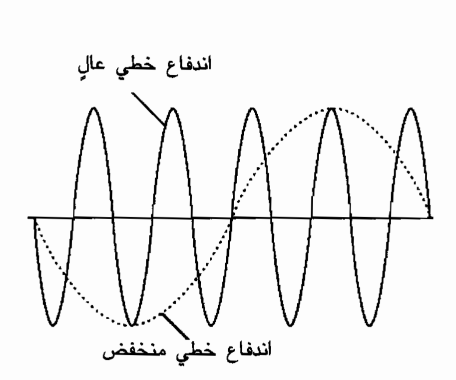
ومجمل القول أن معادلة شرودينغر هي معادلةٌ تحدِّدُ تقوُّسَ curvature دالّةٍ موجيّةٍ: إنها تنبئنا بالأمكنة التي يكون فيها تقوس الدالة الموجية شديداً، أو طفيفاً. ويكون التقوس أشد ما يمكن حيث تكون الطاقة الكامنة للجسيم كبيرةً، ويكون أقل ما يمكن حيث تكون الطاقة الكامنة منخفضةً. وعلى سبيل المثال، فإن الدالةَ الموجيّة للقرص الموجود في نهاية نواس (بندول) pendulum تبدو مشابهةً، إلى حد ما، لتلك الواردة في الشكل 7-5: فالقرص (الموجود في أسفل النّواس) يتحرك بأعلى سرعة في النقطة التي تقع في منتصف مسار اهتزازه، وبأخفض سرعة في طرفي هذا المسار، حيث يتغير اتجاه حركته، ونحن نرى كيف تكون الدالةُ الموجيّةُ مقوّسةً بشدةٍ قرب نقطة المنتصف من مسار تذبذب القرص. لاحِظْ أيضاً كيف أن أكبر سعةٍ للدالة الموجية تحدث قرب طرفي المسار: وهذا ينسجم مع السلوك المألوف للنواس (البندول) لأن الاحتمال الأكبر هو وجوده حيث يتحرك بأبطأ سرعة، أي في طرفي مسار التذبذب اللذيْن يوشك فيهما على تغيير اتجاه حركته.



الشكل 7-5. دالة موجية نموذجية (في اليسار). هذه دالة موجية لنواس (بندول) هُزَّ بقدرٍ قليل من الطاقة. إن مربع الدالة الموجية (المبيّن في اليمين) ينبئنا باحتمال وجود النواس المتأرجح بأي إزاحة عن موضعه التوازني. وقد عبّرنا عن هذا التفسير بواسطة كثافة التظليل في الشريط الذي أضيف إلى المخطط.

لِنَرَ الآن كيف تبدو بعض الدّوالّ الموجيّة النموذجيّة الأخرى. الدّالة الموجيّة لجسيمٍ طليقِ الحركةِ بسيطةٌ جدًّا. لنفترض أن الجسيمَ الذي نفكّر فيه هو خرزةٌ تستطيع الانزلاق على سلكٍ أفقي طويل. الطاقة الكامنة للخرزة لا تتغير عندما يتغير موقعها على السلك، لذا يمكننا التوقع بأن الدالةَ الموجيَّةَ لن تفضِّلَ أيَّ





الشكل 7-6. يبيّن المخطّط في اليسار دالّتيْن موجيّتيْن لخرزةٍ تنزلق على سلك أفقي طويل، حيث توجد أداتان لإيقاف الحركة في طرفيه. تقابِلُ الدالة الموجية الأولى اندفاعاً خطياً منخفضاً، والأخرى اندفاعاً خطياً عالياً. أما المخطط الأيمن فيبيّن احتمالَ العثورِ على الجسيم الذي يتحرك بسرعةٍ أعلى في النقاط الموجودة على طول السلك.

منطقةٍ معينةٍ على غيرها. للجسيمِ البطيء طاقةٌ حركيّةٌ صغيرةٌ، لذا فإن لدالّتها الموجيّةِ تقوساً صغيراً (الشكل 7-6)؛ وبعبارة أخرى، فإن الدالة الموجيةَ لجسيمٍ يتحرّك ببطءٍ هي موجة منتظمة طولها الموجي كبير، وهذا تماماً ما تُنْبِئُنَا به علاقةُ دُو بْرُويل. إن جسيماً سريعاً ـ له طاقة حركية عالية ـ لا بد أن تكون له دالة موجية ذات تقوسات كثيرة، لذا فإنها تعلو وتنخفض عدة مرات، بحيث تفصل بينها مسافةٌ صغيرةٌ، ومن ثَمَّ فإنها موجةٌ منتظمةٌ لها طولٌ موجيٌّ صغير جدًّا. وهذا، أيضاً، ما تتنبّأ به بالضبط علاقة دو برويل.

تُرَى، أين يُحْتَمَلُ العثورُ على الجسيمِ؟ لنفكّر في الخرزةِ بأنها تنزلق جيئةً وذهاباً على طول السّلك بين نهايتي اللتين ثُبّتَ فيهما أداتان لإيقاف الحركة، ولنفتّشْ فيه عشوائياً. لما كانت الخرزة تتحرك بسرعة ثابتة، فوفقاً للفيزياء الكلاسيكية، ثمة فرص متساويةٌ للعثور عليها في أي نقطة من السلك. لكنّ للميكانيك الكموميّ يملك تنبؤاً مختلفاً. فللتنبؤ بالمكان الذي توجَدُ فيه الخرزة، سنستفيد من اقتراح بورن وهو: نحسب مربع الدالة الموجية في كل موقع، ونفسّرُ النتيجَة بأنها احتمالُ العثورِ على الجسيم في ذلك الموقع. وكما

ترى من المخطط، فإن أكبر احتمالٍ بأنها احتمالُ العثورِ على الجسيم في ذلك الموقع. وكما ترى من المخطط، فإن أكبر احتمالٍ هو العثورُ عليها في سلسلةٍ من المناطق تفصل بينها مسافات متساوية على طول السلك، وليست موزعة بانتظام تام.

لِنَرَ الآن كيف تتلاءم الدالة الموجية لجسيمٍ طليقٍ مع مبدأ الارتياب، أي أنه إذا كنا نعرف الاندفاع الخطي، فلا يمكننا معرفة موقع الجسيم، والعكس بالعكس. إن الدّوّال الموجيّة، كتلك الواردة في الشكل، منتشرةٌ على طول السلك، لذا لا يمكننا التنبؤ بالمكان الذي يُعْثَرُ فيه على الجسيم: إذْ يمكن أن يوجد في أي مكانٍ على طول السلك. ومن جهة أخرى، نحن نعلم فعلاً الاندفاع الخطّيّ بالضبط، لأن للموجة طولاً موجيًّا محدّداً تماماً. لذا فنحن نعرف الاندفاع الخطي تماماً، لكنْ ليس بوسعنا قولُ أيِّ شيء عن الموقع، وهذا ينسجم تماماً مع متطلَّب مبدأ الارتياب. وفي الحقيقة، فإن معرفتنا للطول الموجيّ تمكِّننا فقط من معرفة قَدْرِ magnitude الاندفاع الخطي: لكن لما كان الجسيمُ غيرَ منتشرٍ بانتظامٍ تامٍّ على طول السلك، فلسنا مرتابين كليًّا في مكانِ وجوده، لذا فإن قليلاً من الجهل بالاندفاع الخطي (باتجاهه) وفّر إمكان معرفة القليل عن مكان وجوده (وتحديداً، مكان عدم وجوده). ويجب أن تكونَ بدأْتَ ترى دقّةَ العلاقةِ بين معرفةِ مكانِ وجودِ الأشياء وبين السرعة التي تتحرك بها.

لنفترض، مع ذلك، أنه صادف أنْ عَرَفْنَا أنّ الجسيم موجود في الواقع في منطقةٍ معينة من السلك. إن دالّته الموجية ستبدو، إلى حد ما، شبيهةً بتلك الواردة في الشكل 7-7، حيث المنطقة التي يُحتمل وجود الجسيم فيها هي تلك التي لها ذروة قوية. وإذا أردنا تحديد اندفاع هذا الجسيم، علينا تعرّف الطّول الموجيّ لهذه الدالة الموجيّة. لكنّ دالةً موجيةً محزومةً (مستدقة الذروة) بقوةٍ ليس لها طولٌ موجيٌّ محدَّدٌ، لأنها ليستْ موجة مُمَدَّدَةً، تماماً مثلما لا يكون لنبضان صوتٍ ـ كالضجيج العالي ـ طولٌ موجيٌّ محدَّد. ما الذي يعنيه الكلامُ عن الاندفاع الخطي لجسيمٍ؟

الشكل 7-7. رزمة موجية ناشئةٌ من تراكب ثلاثين دالّة موجية كتلك التي رأيناها في المخطط السابق، لكن بأطوال موجية متباينة. ومع أنّ من المحتمل العثور على الجسيم في منطقة معرّفةٍ جيّداً من الفضاء، فليس بوسعنا قولُ أيِّ شيءٍ عن أيٍّ من القيم الثلاثين للاندفاع الخطّي الذي يملكه الجسيم. وسنرى في المناقشة في وقت لاحقٍ أنّ هذه الرزمة الموجيّة تتحرك بطريقةٍ تشبه الجسيم التقليدي.

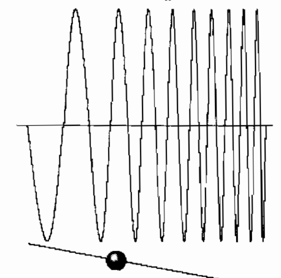
يمكننا التفكير في الدالة الموجية المستدقّةِ الذّروةِ في الشكل 7-7 كما لو أنها نشأت نتيجة جمع ـ المصطلح التقني تراكب superposing ـ عددٍ كبيرٍ من
أنها نشأت نتيجة جمع ـ المصطلح التقني تراكب superposing ـ عددٍ كبيرٍ من
الأمواج التي لها أطوالٌ موجيّةٌ محدَّدةٌ، لكنْ مختلفةٍ، كلٌّ منها يوافق اندفاعاً خطيًّا محدّداً. وكما هو مبيَّن في الشكل، فإن هذه الأمواج تُجمع معاً حيث تتطابق ذراها لتولّد ذروة الدالة الموجية الفعلية، ويُلغي بعضُها بعضاً في أي مكان آخر تتطابق فيه ذراها وأغوارها. يُسمّى مثل هذا التراكب للدوال الموجية رزمة موجية ـ أو رزمة أمواج wavepacket. وعندما نسأل عن قيمة الاندفاع الخطي لجسيم له دالة موجية كتلك الواردة في الشكل، فعلينا القول إنها أيّ واحدة من القيم الممثلة بالأطوال الموجية التي استُعملت لتشكيل رزمة موجيّة. أي أن لجسيْمِنَا المتوضِّعِ جزئيًّا اندفاعاً خطيًّا غيرَ منتهٍ، تماماً مثلما يتطلّب مبدأ الارتياب.

إذا عرفنا بالضبط أين كان الجسيم في أي لحظة، فسيكون لدالّته الموجية سنبلةٌ ذاتُ ذروةٍ مستدقةٍ جدًّا، وستكون السعة صفرية أينما كان باستثناء موقع الجسيم. هذه السنبلة هي أيضاً رزمة موجية، لكن للحصول على حِدَّةٍ sharpness غير منتهية للموقع، علينا إحداثَ تراكبٍ لعددٍ غيرِ منتهٍ من الموجات التي لها أطوالٌ موجيّةٌ مختلفةٌ، ومن ثَمَّ اندفاعات مختلفة. نستنتج، كما ينبئنا مبدأ الارتياب بالضبط، أن المعرفة الدقيقة لموقع الجسيم تلغي كل إمكانية

لتحديد اندفاعه الخطي. مبدأ الارتياب هو الصيغة الكمومية للضياع: فإمّا أن تعرف أين توجَدَ، لكنْ لا تعرف إلى أين أنتَ ذاهبٌ، أو أنك تعرف إلى أين أنت ذاهب، لكنْ لا تعرف أين أنت.

يساعدنا مفهوم رزمة الأمواج على بناء جسر بين الميكانيك الكمومي وبين الألفة المريحةِ مع الميكانيك الكلاسيكي، لأنه ينقل بعض سمات الجسيمات التقليدية. ولرؤية الرابطة بينهما، لنفكر في خرزةٍ تنزلق على سلك غير أفقي وينحدر نحو الأسفل من اليسار إلى اليمين. تقليدياً، نحن نتوقع أن تنزلق الخرزة على السلك إلى الأسفل، وأن تتزايد سرعتها. لكن ما الذي يقوله الميكانيك الكموميّ؟

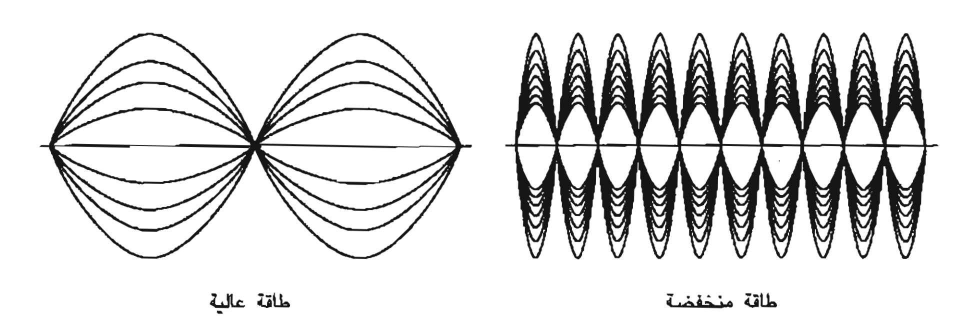
أولاً، نحن بحاجةٍ إلى صياغة الدالّة الموجية للخرزة، ولفعلِ ذلك، يمكننا استعمال معرفتنا بما تنبئنا به معادلة شرودينغر عن التقوّس. لما كانت طاقة الخرزة ثابتة (الطاقة منحفظة، الفصل 3) وطاقتها الكامنة تتناقص من اليسار إلى اليمين، فإن طاقتها الحركية تتزايد من اليسار إلى اليمين على طول السلك. إن الطاقة الحركية المتزايدة تتوافق مع التقوس المتزايد. ويمكننا التوقع بأنه سيكون للموجة طول موجي يصغر من اليسار إلى اليمين. إن مثل هذه الدالة الموجية لجسيم ذي طاقة كلية محدَّدة تماماً، ستبدو قريبةً من تلك الممثلةِ في الشكل 7-8.



الشكل 7-8. الشكل العام لدالة موجية لخرزة تنزلق على سلكٍ يميل بزاوية على الخط الأفقي، لذا يكون لها طاقة كامنة أخفض باتجاه اليمين. لاحظ أن طول الموجة يَقْصُرُ حين نسير باتجاه اليمين، وهذا يقابل تقليدياً الطاقة الحركية المتزايدة للجسيم خلال انزلاقه إلى الأسفل على السلك.

بعد ذلك، نحن بحاجةٍ إلى معرفة شيءٍ ما عن طريقة تغيّر الدالة الموجية مع الزمن. النقطة الجديدة، التي يجب الحفاظ عليها في ذهننا، هي أن الدالة الموجية تتذبذب بتردد يتناسب طردياً مع الطاقة الكلية للجسيم. يمكننا تصوّر الدالة الموجيّة للجسيم المتحرك ببطء (الطاقة منخفضة) بأنه يتذبذب ببطء، والدالة الموجية للجسيم المتحرك بسرعة (الطاقة عالية) بأنه يتذبذب بسرعة

(الشكل 7-9)[11]. هذا وإن الدالة الموجية في الشكل 7-8 تتصرف بنفس الطريقة، وتتذبذب بمعدلٍ تحدّده طاقتها.



الشكل 7-9. تمثيلٌ لعلاقة الدّوالّ الموجيّة بالزمن. تتذبذب الدوال الموجية مع الزمن بمعدل يتوقف على طاقاتها. لقد حاولنا اقتراح كيف تتذبذب الدالتان الموجيتان في الشكل 7-6: فالدالة الموجية ذات الطاقة الحركية العالية (في اليمين) تتذبذب بسرعة أعلى من الدالة الموجية ذات الطاقة الحركية المنخفضة (في اليسار).

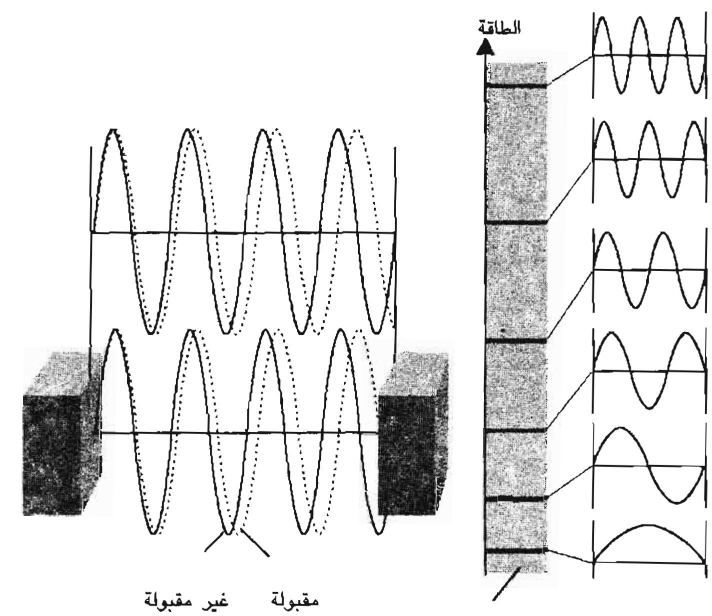
أخيراً، لنفترض أننا لا نعرف طاقة الخرزة بالضبط (قد تكون يدانا اللتان تحملان السلك ترتجفان، وقد تكون جزيئات الهواء تضرب الخرزة بعنف). في هذه الحالة، لن تكون الدالة الموجية منفردة كتلك التي رسمناها، لكن، بدلاً من ذلك، ستكون مجموعَ عددٍ كبيرٍ من دوالّ موجيةٍ متشابهةٍ لها أشكال مختلفة اختلافاً طفيفاً. التراكب الحاصل هو رزمة موجية كتلك التي أوردناها في الشكل 7-7. وكما سبق ورأينا قبل قليل، فكلٌّ من الدّوالّ الموجية المنفردة يتذبذب مع مرور الوقت، وفي الفضاء أيضاً، لذا فالشكل الذي تولّده، عندما يُضَافُ بعضُها إلى بعضٍ، يتغيّر، لأنه في لحظةٍ ما قد تُضاف الذُّرَا بعضها إلى بعضٍ في موقعٍ واحدٍ، لكن بعض هذه الذُّرَا يتحول إلى أغوار، وعندئذٍ تأخذ الرزمة الموجية

(11) قد تعجب من جسيم يختفي ثم يعود إلى الظهور مع تذبذب الدالة الموجة بمرور الزمن. لقد بسّطْتُ هذه الفكرةَ. ما تفعله الدالةُ الموجيّةُ في الواقع هو التذبذب من قيمة حقيقية إلى قيمة تخيلية، ثم تعود إلى قيمتها الحقيقية، لذا فإن مربعها يبقى على حاله دون أي تغيير. أنا لا أنوي أن أُجُرَّكَ إلى مناقشةٍ تتعلّق بتعقيدات هذا الموضوع.

شكلاً مختلفاً. وعندما نفحص المجموع، يتبيّن أنّ منطقةَ التداخلِ البنّاءِ تؤدي إلى نشوء حركات الرزمة الموجية من اليسار إلى اليمين. وهي أيضاً تكتسب سرعة حيث يكون للأمواجِ أقصرُ الأطوالِ الموجيّةِ، وذلك في اليمين. أي أن الخرزةَ تتسارع من اليسار إلى اليمين، مثلما تفعل تماماً في الفيزياء الكلاسيكية. وهكذا فعندما تشاهد الأجسامَ التي تقوم بحركاتها اليومية المألوفة - الطابات المرتدّة عن سطح، الطائرات المحلّقة في الهواء، الناس الذي يمشون - فعليكَ أن تُدْخِلَ في ذهنِكَ أنّكَ تشاهدُ رزمةً موجيةً، وأن التموّجات تحت سطحها هي تراكب لأمواج.

●

يقدِّم الميكانيك الكمومي عدداً من التنبؤات تختلف اختلافاً شديداً عما يتنبّأ به الميكانيك الكلاسيكيّ، وقد حان الوقتُ الآن للنظر في هذه الاختلافات. لنفترض أن السلكَ الأفقيَّ قصيرٌ، وأنّ الخرزة مقيّدةٌ بالانزلاق عليه مجرد بضعة أمتار، وأن طرفيْه يحويان مَلْزَمَتَيْنِ لإيقاف حركة الخرزة. السّمةُ الجوهريّةُ هي أنه لا يُسمح إلاّ للدوال الموجية الملائمة بين طرفي السلك، وذلك تماماً مثلما تكون اهتزازاتُ وَتَرِ كمانٍ مشدودٍ مقصورةً على الأمواج الملائمة بين طرفي الوتر. ولما كان تقوّس الدالة الموجية يحدِّد الطاقةَ الحركيةَ للخرزة، ومن ثَمَّ طاقتَهَا الكلية (لأن الطاقة الكامنة ثابتة)، فإننا نستخلص أنه يمكن للخرزة في هذا الترتيب أن تمتلك طاقات معينة فقط. وبعبارة أخرى، إن طاقة الخرزة مُكَمَّمَةٌ quantized، أي أنه يعبَّر عنها بقيمٍ متقطّعةٍ، لا بمتغيرٍ مستمرٍّ (الشكل 7-10). هذه نتيجة عامة: إن تكميم الطاقة energy quantization، كالتكميم الذي اقترحه أصلاً بلانك وآينشتاين، هو نتيجةٌ لمعادلة شرودينغر، والمتطلَّب الذي يستلزم أن تكون الدالة الموجية ملائمةً تماماً للفضاء الذي يمكن أن يجول فيه الجسيم. هذه هي الطريقة التي يبرز فيها تكميم الطاقة آليًّا من معادلة شرودينغر وما يسمى «الشروط الحدّيّة» boundary conditions للنظام.



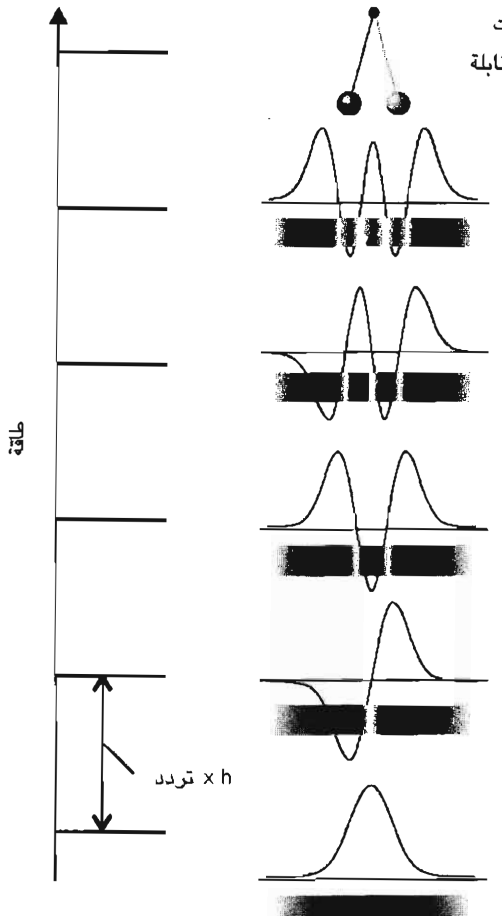
الشكل 7-10. عندما يُحصر جسيمٌ في منطقة محدَّدة من الفضاء، لا يُسمح إلا لتلك الدوال الموجية التي تلائم المنطقة الحاوية، وللطاقات الموافقة فقط. ونرى، في اليسار، مشهداً مباشراً لدالتينْ موجيّتيْن: إحداهما ملائمة للمنطقة التي تحصر الجسيم، وهي مسموح بها، والأخرى (المنقطة) غير ملائمة، ومن ثم غير مسموح بها. ونرى في اليمين أثر الطاقة: ويبيّن الشريط الرمادي اللون الطاقات المسموح بها كلاسيكيًّا، وتبيّن الخطوط الأفقية أول ستة مستويات من الطاقة المكمّمة المسموح بها. أما الدوال الموجية الموافقة فَمُبَيَّنَةٌ في أقصى اليمين.

ويبدو التكميم بوضوح بطريقة مثيرة للاهتمام في نوّاس (بندول) له سمة استثنائية. أولاً، لنأخذ الدالة الموجية لموقع القرص في نهاية النواس الذي يتأرجح بطاقةٍ محدَّدةٍ بالضبط (لذا فهي حالة كمومية محدّدة). إن الطاقة الكامنة ترتفع عندما يتأرجح القرص إلى كلّ من الطرفين، لذا فإن طاقته الكامنة تنخفض لتبقى الطاقة الكلية ثابتة، ويمكننا، كلاسيكيًّا، توقع أن يكون للدوال الموجية أكبرُ سعةٍ في طرفي التأرجح حيث يبلغُ تباطؤ حركةِ القرصِ حدَّه الأعلى. وقد سبق ورأينا مثل هذه الدالة الموجية (في الشكل 7-5). وفيما يتعلق بالخرزة المنزلقة على سلك ثُبّتَ في طرفيه ملزمتان، فالدّوال الموجية الوحيدة المسموح بها هي تلك الملائمة لمدى القيم التي يسمح بها التأرجح، من نقطة انعطاف إلى نقطة

انعطاف. وبسبب كون البعض فقط، من جميع الدوال الموجية التي يمكن تصورها، تسلك سلوكاً سليماً، وكون كل دالة موجية تقابل طاقة مختلفة عن غيرها، فإنه يترتب على ذلك أن البعض فقط من الطاقات مسموحٌ به. وقد تبيّن أن هذه الطاقاتِ المسموحَ بها تكوِّن سُلَّماً منتظماً من القيم، يفصل بين «درجاته» المقدار التالي: التردد × **h** حيث h ثابت بلانك، والتردد (الذي سنتحدث عنه أكثر بعد قليل) هو وسيط يتناسب عكسياً مع الجذر التربيعي لطول النواس. وفي حال نواسٍ طوله متر واحد، موجودٍ على سطح الأرض، يكون التردد نحو 0.5 هرتز، لذا فإن الفاصل بين مستويات الطاقة المسموح بها صغيرٌ جدًّا، ولا يمكن كشفه إطلاقاً، إذ إنه يساوي 3×10^{-34} جول؛ لكنه موجود[12]. وفي الشكل 11-7، يوجد بعض هذه الطاقات والدوال الموجية الموافقة لها.

وهاك الآن السّمة المذهلة. لنفترض أننا نعيد قرصَ النواس إلى الوراء ليتأرجح. إنه سيتأرجح بمدىً من الطاقات، ربما بسبب صدم جزيئات الهواء أو خشونة محور التعليق. لذا فإن الدالة الموجية الفعلية ستكون الرزمة الموجية المشكّلةَ من تراكب عددٍ كبيرٍ من الدوالّ كتلك الموضحة في الشكل. هذه الرزمة تتموّج من طرف إلى طرف، وتتحرك بأعلى سرعة عندما يكون النواس رأسياً، وبأدنى سرعة في طرفي التأرجح، مثل النواس التقليدي تماماً. أضف إلى ذلك ـ وهنا تكمن النقطة الاستثنائية ـ أن تردد التأرجح ـ معدل تذبذب قرص النواس في تأرجحه من طرف إلى طرف ـ يساوي بالضبط تردّدَ الوسيط الذي يَرِدُ في عبارة انفصال مستويات الطاقة المكمَّمة. لذا فعندما تشاهد نواساً يتأرجح، فأنت لا ترى حركة رزمة موجية فحسب، بل أنت ترى أيضاً، من تردده، صورة مباشرة لمستويات الطاقة التي يتزايد اقتراب بعضها من بعض. وبعبارة أخرى، فأنت تشاهد التكميم مباشرة. النواس هو مضخّم قوي للكميات الفاصلة بين مستويات طاقته المكممة، وعندما تشاهد نواساً طوله متر واحد يتأرجح جيئة وذهاباً، فإنك تراقب كمية فاصلة للطاقة بمقدار 3×10^{-44} جول مباشرة. وأنا أظن أن هذا شيء مذهل.

(12) في حال نواس، يساوي التردد $(1/2\pi)\sqrt{g/\text{الطول}}$، حيث g تسارع السقوط الحر (على مستوى البحر في الأرض g=9.81 متر/ثا^2).



الشكل 7-11. يبين هذا المخطط مستويات الطاقة القليلة الأولى والدوال الموجية المقابلة لنواسٍ. لاحظ أن مستويات الطاقة تفصل بينها مسافات متساوية. يجب أن تلاحظ أيضاً أن الدوال الموجية التي لها أدنى طاقة لا تشبه ما اقترحناه لهيئة الدوال الموجية العالية الطاقة (كتلك الواردة في الشكل 7-5)، لأن من المحتمل وجود النواس قريباً من الانزياح الصفري من الشاقول، وليس موجوداً في نقطتي انعطافه. ويمكننا استعمال أفكار تقليدية لترشيد أفكارنا عن الدوال الموجية في الطاقات العالية فقط.

الرسائل الرئيسية التي نتلقاها من هذه المناقشة هي أن التكميم ينتج بطريقة طبيعية من معادلة شرودينغر، وأن السلوك التقليدي يبرز عندما يكون المستوى الكمومي الدقيق مجهولاً ويتعيّن علينا أن نشكّل رزمة موجية.

●

لقد أدخلْتُ في سردي للموضوع كلمةً مركزيّةً في مسألة تفسير الميكانيك الكموميّ، ألا وهي كلمة احتمال probability. وسنستكشف فيما تبقى من هذا

الفصل اقتضاءات وعواقب هذه الكلمة المراوغة والغامضة، ذلك أنها في غاية الأهمية فيما يتعلق بالطريقة التي نفكّر بها في العالَم. وفي الحقيقة، فأنا أريد العودة إلى عدة سماتٍ للمناقشة التي أجريناها حتى الآن، وسأحاول استخراجها من عدد من المواضيع الفلسفية. وقد تَرَدَّدْتُ آنذاك في كتابة «المواضيع المعرفية epistemological والوجودية ontological»، أي المواضيع المتعلقة بطبيعة المعرفة وبأساسيات حقيقة الوجود. لكنني لست فيلسوفاً، ولا أريد توليد انطباعٍ بأنني أستعمل في ملاحظاتي أي تقنيّة فلسفية. لذا قررت أن أكتب كلمة «مواضيع» وأبقيها كذلك.

أود تقديم ملاحظة أخرى. إن المادة السابقة الواردة في هذا الفصل هي كل ما تحتاجُ إليه حقيقةً لتعرِفَ ما إذا كنتَ تبغي استعمال الميكانيك الكموميّ. وبالطبع، فإنني جاوزت التفصيلاتِ التقنيةَ والرياضيةَ، لكنّ كل ما أوردتُهُ هو مباشرٌ، وواضحُ المعالم، وغيرُ مثير للنزاع إلى حدٍّ معقول. إن نسبة الثلاثين بالمئة من الاقتصاد الأمريكي المستند إلى الميكانيك الكُمومي هي نتيجةٌ لاستعمال هذا الموضوع. ويغدو الميكانيك الكُمومي مثيراً فلسفياً عندما نبدأ بالسؤال عما يعنيه هذا كله. وهذا هو موضوع ما تبقى من هذا الفصل. وإذا توقفت هنا، فستكون قد ألمحْتَ بالمبادىء الأساسيّة للميكانيك الكُمومي، ويمكنك، من وجهة المبدأ، استعماله لإجراء أي حسابات؛ أمّا إذا قررت الاستمرار، فإن قدرتَكَ على استعماله لن تزداد كثيراً، لكنك ستعرِفُ السبب في كون الناس يجدون هذا الموضوع محيِّراً ومذهِلاً إلى حدٍّ بعيد.

أولاً، سأعالج مبدأ الارتياب، وسأحاولُ تسويغَ العنوانِ الفرعيّ لهذا الفصل وهو: تبسيط الفهم. وكثير من الناس ـ من ضمنهم آباء هذا الموضوع ـ يرون أن مبدأ الارتياب يحدّ من فهمنا للعالَم، بمعنى أنه لما كنا لا نعرف موقعَ جسيمٍ واندفاعَه الخطيَّ في آنٍ واحدٍ، فلن يتيسّر لنا سوى معرفةٌ ناقصةٌ لحالته. هذه الرؤية المتشائمة هي، في اعتقادي، نتيجة لثقافتنا. لقد رُبِّينَا على تَقَبُّلِ الفيزياء الكلاسيكية، وعلى الأُلفة مع الأحداث اليومية التي تجري في هذا العالَم، وعلى الإيمان بأن الوصف الكامل للأشياء في العالَم يجب أن يقدَّم بدلالة الموقع

والاندفاع الخطي. ونعني بذلك، أنه بغيةَ وصفِ مسارِ كرةٍ طائرةٍ، علينا معرفة موقعها واندفاعها في كل لحظة. لكن ما يُبيّنه الميكانيك الكموميّ، وبخاصة مبدأ الارتياب، أن مثل هذا التوقّع، أي الوصف بدلالة هاتين السمتين، مفرطٌ في الكمال overcomplete. والعالَم ليس، ببساطة، على هذا النحو. فالميكانيك الكُمومي ينبئنا أنّ علينا الاختيار. علينا الاختيار بين دراسة العالَم عن طريق تحديد مواقع الجسيمات، وبين دراسة العالَم عن طريق اندفاعات الجسيمات، وبعبارة أخرى، يتعين علينا الكلام فقط عن موقع كرةٍ، أو الكلام فقط عن اندفاعها. وبهذا المعنى بالذات، يكون مبدأ الارتياب تبسيطاً أساسياً لوصفنا العالَمَ، لأنه يبيّن أن توقعاتنا التقليدية خاطئة: فالعالَمُ، بكل بساطة، ليس هو الصورة التي تفرضها علينا الفيزياء التقليدية وأُلفتنا بها.

لِنَمْشِ خطوةً أخرى في حديثنا هذا. إن مبدأ الارتياب يستدعي استعمال لغتين لدراسة العالَم: لغة الموقع ولغة الاندفاع. وإذا حاولنا استعمال كلتا اللغتين في آن واحد (كما تفعل الفيزياء التقليدية، وكما يسعى أولئك المكيَّفين سلفاً مع مبادئها)، فيمكننا توقّع الغوص في وحل مزعج، تماماً مثلما يحدث لنا إذا حاولنا صوغ جملة واحدة باللغتين الإنكليزية واليابانية. ويُروى عن هايزنبرغ نفسه ملاحظته أن «الدعوى القائلة إنه للتنبؤ بمستقبل العالم لا بد لنا من معرفة حاضره، هي دعوى خاطئة». ومع ذلك، فهو الذي كان على خطأ. التفسير الصحيح لمبدأ الارتياب هو أنه يكشف النقاب عن أن الفيزياء التقليدية تكافح للتوصل إلى معرفةٍ مضلِّلةٍ ومفرطةٍ في الكمال للحاضر: فالاندفاعات وحدها ملائمة، وإلاّ، فالمواقع وحدها ملائمة بصفتها معرفة كاملة للحاضر.

إن هذا التفسير لمبدأ الارتياب ينسجم مع الموقف الفلسفي الذي اعتمده نيلز بور عام 1927 في مبدئه في التَّتامِّ principle of coplementarity وهذا مصطلح يبدو أن بُور اقتبسه من كتاب وليام جيمس W.James بعنوان مبادىء علم النفس The principle of psychology. ومَثَلُهُ مَثُل الكثير مما كتب بور، فهذا المبدأ ليس واضحاً كلياً، لكنه ينص على وجود طرائق بديلة للنظر إلى العالَم، وأنه يجب علينا اختيار وصف أو آخر له، دون أن نخلط بين هذه

الأوصاف. وقد حاول بور استعمال مبدئه في الأدب والعلوم الاجتماعية بنفس الطريقة التي اختُطِف بها مبدأ النسبية وأُفسد بتطبيقه في أدبياتٍ لا علاقةَ لها بهذا المبدأ، لكننا سنتطرق إلى الارتباط الذي هو أكثر وثوقية لمبدأ بور بالنظرية الكمومية.

يعدّ مبدأ بور مركِّبةً مركزيةً في تفسير كوبنهاغن Copenhagen interpretation للميكانيك الكموميّ الذي أسهم بور في بناء دعائمه. تفسير كوبنهاغن هو نسيج من المواقف من تفسير بور الاحتمالي للدالة الموجية، وهو مبدأ التَّتَامّ الذي يفسَّر كميًّا بواسطة مبدأ الارتياب، والذي هو وجهة نظر «وضعية» للطبيعة التي عناصر حقيقتها مقصورة على نتائج القياسات التي تُجْرَى باستخدام جهاز يستعمل المبادئ الكلاسيكية. القياسات هي نافذتنا الوحيدة على الطبيعة، وكل شيء لا يمكن رؤيته عبر هذه النافذة ليس سوى توقّع ميتافيزيقي، ولا يستحق النظر إليه باعتباره حقيقياً. وهكذا فإذا هُيِّئ جهازُك المخبريُّ لفحص السِّمات المميزة الموجيّة «لجسيم» (كي نبين، مثلاً، انعراجَ إلكترونٍ)، عندئذٍ يحق لك الكلام بمصطلحاتٍ موجيّةٍ. وبالمقابل، إذا حُضِّرَ جهازك لفحص الخاصيات الجسيميّة corpuscular «لجسيمٍ» (مثلاً، لتحديد موقع وصول إلكترون على لوحة فوتوغرافية)، فمن المناسب لك عندئذٍ استعمال لغة الجسيمات. هذا ولا وجود لآلة يمكنها التوصل إلى الخاصيات الموجيّة والجسيميّة كلتيهما في آن واحد، لأن هاتين السمتين متكاملتان. كانت هذه، في الأساس، وجهة نظر هايزنبرغ، لأنه عدّ الميكانيكَ الكمومَيّ مجرّد طريقةٍ للربط بين الأرصاد التجريبية المختلفة، وليس طريقةً لإماطة اللثام عن أيّ شيء يتعلق بالواقع الضمنيّ: وفيما يتعلق به وبرجال الكنيسة الملتزمين من سكان كوبنهاغن، فنتيجة الملاحظات والأرصاد هي الحقيقة الوحيدة.

إن سمة تفسير كوبنهاغن التي سنركّز عليها هي عملية القياس. فالقياس هو مركِّبةٌ أساسية للتفسير في الميكانيك الكموميّ. إنه حاسم في تفسير كوبنهاغن، ذلك أن هذا التفسير يلحّ على دور جهاز القياس في كشف الحقيقة. لكنْ أياً كان التفسير الذي نُلزِمَ به الميكانيك الكموميّ، فثمة شيء يحدث حيث

يتعين علينا إجراء مقابلة بين تنبؤاته ومشاهداته، لذا فإن فهم السطح البينيّ interface الموجود بين التنبؤ والمشاهدة يحظى بأهمية كبيرة.

●

وهنا نصل إلى ما قد يكون أصعب سمة - لكنها أكثر السمات مركزيّةً - لتفسير الميكانيك الكمومي. لقد حاولْتُ تبسيطَ المواضيع قدر الإمكان دون إضاعةِ جوهر المناقشة. أنا حسّاسٌ جدًّا لدقة البراهين، وقد فعلتُ كلَّ ما بوسعي لجعلها جليّةً قدر الإمكان. فإذا كان ما سَيَرِدُ جافًّا جدًّا، فلا تتردّدْ في القفز إلى الفصل التالي، لأنّ الفصولَ التاليةَ لا تعتمدُ على النقاش الوارد هنا.

وبمصطلحاتٍ عامة، إن عملية قياسٍ هي تصويرُ خاصيةٍ للميكانيكِ الكموميّ بوصفها مُخْرَجَ جهازٍ ماكروسكوبيٍّ. ويُسمَّى هذا المُخرجُ، عموماً، «قراءة المؤشّر» pointer reading، لكنْ يمكن أن يعني هذا المصطلح «مُخْرَجَ» نظامٍ واسع النطاق، مثل العدد المعروض على شاشة مراقبة، أو ملاحظة مطبوعة على ورقة، أو قرقعة تسمعها آذاننا، أو حتى العثور على قطة ميتة داخل صندوق. ويصرّ تفسير كوبنهاغن على أن تقوم آلة القياس بعملها كلاسيكياً، لأنه يجب عليها رسم العالَم الكموميّ بدلالة الكميات التي يمكننا ربطها به. ومع أن تفسير كوبنهاغن كان مهيمناً طوال عدة سنوات، دون أن يكون، مطلقاً، على حساب دور بُور المؤثر، فهو غير معتمَدٍ عالميًّا البتةَ. وإحدى نقاط ضعفه هي إلحاحه على نمطٍ معيّنٍ من أجهزة القياس. والبديل هو أن جهاز القياس يعمل أيضاً على المبادىء الكمومية. وسنتقصّى ذلك في وقت لاحق.

لنفترض أن لدينا كاشفاً detector يصبح أحمرَ اللون في حال غياب إلكترون، وأخضر اللون في حال وجوده. يُمثِّلُ الإلكترون بدالّةٍ موجيّةٍ تنتشر عبر الفضاء وتنبئنا عن طريق مربعها، كما رأينا، باحتمال العثور على الإلكترون في كل نقطة من الفضاء. فإذا أدخلنا كاشفَنَا في المنطقة التي نعتقد بأن الإلكترون

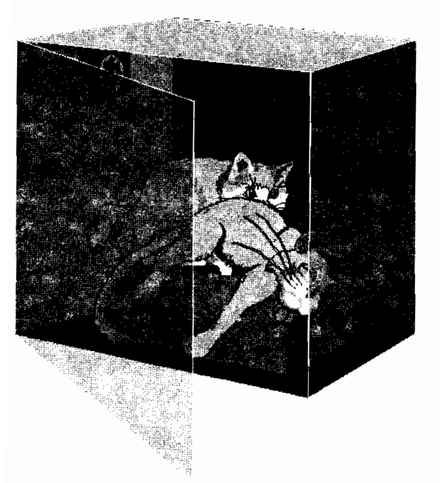
موجود فيها، فالأكثر احتمالاً هو الحصول على ضوء أخضر، حيث يكون الطول الموجيّ كبيراً، ويكون الاحتمال أقل حيث يكون الطول الموجي صغيراً، وسينبئنا مربع الدالة الموجية باحتمال حصولنا على الضوء الأخضر (مثلاً، مرةً واحدة كلّ عشر محاولات).

وإذا استمر الضوء الأخضر عندما نثبت الكاشف في موضعه، عندئذٍ نعرف بما لا يقبل الشك أن الجسيم موجود في ذلك الموقع. وقبل كشف وجود الجسيم مباشرة، كنا نعرف فقط احتمال كون الإلكترون هناك. لذا، فبمعنًى واقعيٍّ تماماً، فإن الدالة الموجية توقّفت عن توسعها لتتخّذ ذروةً مستدقةً متوضعةً عند الكاشف. يُسمَّى هذا التغيرُ في الدالة الموجية، بوصفه نتيجةً للاستقصاء باستعمال جهاز تقليدي، انهيارَ الدّالةِ الموجية collapse of the wavefunction. وكلما قُمنا نحن المراقبين بإجراء مراقبة، انهارت الدالة الموجية إلى موقع محدّد يقابل قراءة المؤشر الذي نرصده. إن التدخل في النظام، الذي يبدو ظاهريًّا أنه يسبب انهيار الدالة الموجية في نقطة معينة، هو المفهومُ المركزيُّ والصعوبةُ المركزيَّةُ في تفسير كوبنهاغن، والمعْضلةُ المركزيّةُ في الرابطة بين الحسابات والرصد. إنه، أيضاً، مصدر وجهة النظر القائلة إن الميكانيك الكمومي يلغي الحتميّة determinism، وهي التسلسل السببيّ بين الحاضر والمستقبل، إذ إن ثمة حججاً تلحّ على عدم وجودٍ للتنبؤ في الميكانيك الكمومي، وذلك قبل إجرائنا للقياسات، بقطع النظر عن أن الدالة الموجية ستنهار، أم لا، في نقطة معينة، لأن كل ما تسمح لنا به هو حساب احتمال فعلها ذلك.

أود الآن تقديم ثلاثة تفصيلات تقنية للميكانيك الكموميّ، ذلك أنها تعدّ نقاطاً مركزية في مسألة القياس وفي حلّها. وسأفعل ذلك باستعمال مسألة قطة شرودينغر التي أصبحت قصة بالية. في هذه القصة الرمزية للكموم، تصوّرَ شرودينغر قطةً محصورةً في قفصٍ معتمٍ فيه جهاز سام يطلق عملَه الاضمحلالُ الإشعاعي. الاضمحلال (التفكك) الإشعاعي عشوائي، لذا، ففي مدة زمنية معطاة، فإن احتمال الاضمحلال يساوي احتمال عدمه. لذا، فوفقاً

للميكانيك الكمومي، فإن حالة القطة خليط من حالتين: ميتة وحيّة (الشكل 12-7)، وعندئذٍ نكتب[13]:

حالة القطة = حالتها حيّةً + حالتُها ميّتةً



الشكل 12-7 ـ قطة شرودينغر. قطة حية محصورة في صندوق معتم يحوي جهازاً بشعاً، يقتل أو لا يقتل القطة. وقبل أن نفتح الصندوق، نطرح السؤال: هل القطة موجودة في تراكبٍ لحالتيْها الميتةِ والحيّةِ؟ متى تنهار الدالة الموجية متحولة إلى هذه الحالة أو تلك؟

وهذا المجموع نظير لتراكب الدوال الموجية الذي استعملناه لإنشاء الرزمة الموجية، والفرق الوحيد هو أنه بدلاً من كون الحالات المتراكبة حالاتٍ للاندفاع، فإنها حالات للقطة. وستكون كتابة الدوال الموجية الحقيقية أكثر من خدعة صغيرة، لكنْ لسنا ملزمين بعمل ذلك.

إن وصفَ الحالاتِ بأنها تراكبٌ هو أصلُ كلِّ الغمِّ الذي ينتابنا في الميكانيك الكموميّ، لأنه يبدو أن لا وجود لآلية للتنبؤ بما إذا كنا سنحصل في ملاحظةٍ تاليةٍ على النتيجة التي مفادها أن «القطةَ حيّة!» أو أن «القطة ميتة!». وحالما نفتح الصندوق، نكتشف ما إذا كانت القطة حيّة أم ميتة، لذا، فبمعنًى من المعاني، فإن الدالة الموجية للقطة تنهار إلى هذه أو تلك من الدالتينْ الموجيتيْن. لكن عند أي نقطة تنهار الدالة الموجية للقطة؟ هل قبل أن نفتَح الصندوق؟ هل

(13) قد يبدو من السذاجة أن نعبر عن الحالات بهذه الطريقة، لكن الميكانيك الكمومي يوفر مجموعة من القواعد تنبئنا كيف نتعامل مع عبارات كهذه للتوصل إلى نتائج كمية دقيقة. عليك ألا تتأثر بهذا الابتذال الظاهري لهذه التعبيرات الرمزية.

خلال فتح الصندوق؟ هل بعد جزء من الثانية في وقت لاحق، وذلك عندما تسجل عقولنا ما إذا القطة حية أم ميتة؟ متى تفكر القطة أنها ميتة؟ كل ما يفعله الميكانيك الكمومي هو وضع القواعد للتنبؤ باحتمالات حدوث هذه الحالات. وهكذا يبدو أن مبدأ الحتمية رَشَحَ من الفيزياء، ويبدو أن الميكانيك الكمومي استسلم لِكَنَفِ الآلهة. وقد أولى آينشتاين هذه السمة اهتماماً كبيراً، وكان غالباً ما يردّد اعتراضه المملّ بأن «اللّه لا يلعب بالنرد». هذا وقد نحّى بور هذا الانتقاد جانباً بملاحظته أن مبدأ السببية يظل مفهوماً تقليدياً على أيّ حال، ومتمِّماً (بمعنًى غامض) لوصفٍ مكانيٍّ لموقع الجسيم. وهذا يعني أنه وفقاً لبور، فإمّا أن تختارَ الفيزياءَ التقليدية وتستفيدَ من ميزات السببية، أو أن تختارَ الميكانيكَ الكُموميّ وتدفع ثمنَ عدم إفادتك من السببية.

من الممكن أن نقدّم مفهوماً مهمًّا آخر بتفكيرنا إجراء تعديل على حكاية شرودينغر، لا تتسمّم فيها القطة، لكنْ تُطْلَقُ النار عليها. فعندما تطلق النار على صندوق القطة العازل للصوت، فإن حالة الجهاز هي: قطة × رصاصة في بندقية[14]. تطلِقُ البندقيةُ الرصاصةَ بواسطة نفس الجهاز العشوائي كما في السابق، لذا ثمة احتمالات متساوية بأن تكون الرصاصة في الهواء، أو أنها ما زالت في البندقية. وفي مرحلة ما، أصبحت حالة النظام:

حالة النظام = قطة × رصاصة في البندقية + قطة × رصاصة في الهواء

وبعد ذلك مباشرة، عندما تكون الرصاصة قد دخلت في القطة (وهذه هي الحالة بالطبع إذا كانت الرصاصة في الهواء)، وهذا يوصلنا إلى قطة ميتة، أو عندما تكون الرصاصة مازالت في البندقية (إذا كانت هذه هي الحالة قبل لحظة)، وهذا يحافظ على حياة القطة، فإن النظام يصبح:

حالة النظام = قطة حيّة × رصاصة في البندقية + قطة ميتة × رصاصة في القطة

(14) حاصل الضرب ـ كيف تجري عملية ضرب قطة في رصاصة؟ ـ قد يبدو غريباً بعض الشيء. لكن حاصل الضرب هذا معرّف تماماً في الميكانيك الكموميّ، وهو، في الواقع، يعني أنّ علينا ضرب الدالة الموجيّة للقطة في الدالة الموجيّة للرصاصة. وباستعمال الرموز الرياضية، يمكن كتابة حاصل الضرب بالصيغة: رصاصة × قطة، حيث دالةٌ موجيّةٌ.

هذا مثال على حالة متشابكة entangled state تكون فيها حالتا القطة والرصاصة متضافرتين حتماً. إذا كانت هذه هي الحالة الحقيقية للنظام، فبإمكاننا توقّع بعض آثار التداخل الغريبة جداً بين حالتي النظام. لكن ما هو تفسير هذا الوصف على الأرض؟ ما الذي يمكن أن يعنيه وجودُ تداخلٍ بين الأطوال الموجية للشكلين الميت والحي للقطة، والمواقعُ المختلفةُ للرصاصةِ؟

لنعالجْ أولاً مسألة التداخل الكمومي بين الحالتين المختلفتين. هذا يُدخِلُ الفكرةَ الهامة الثالثة، وهي حل الترابط decoherence. ربما كان هذا أدقَّ جزءٍ من المناقشة، وسأبذل ما بوسعي لإبقاء المفاهيم في مرمى البصر على الأرض. ليست القطة جسيماً وحيداً منعزلاً. إنها مكوّنة من تريليونات الذرّات، ثم إن دالتها الموجية الإجمالية هي دالة بالغة التعقيد لمواقع هذه الذرات. إن الحالتين الداخلينْ في النظام (قطة حية × رصاصة في البندقية، وقطة ميتة × رصاصة في القطة) تتطوران مع الزمن وفقاً لمعادلة شرودينغر بطريقتين مختلفتين تماماً وبسرعة عالية. وخلال جزء صغير من الثانية، تصبح الدالة الموجية للقطة الميتة مختلفة كلياً عن الدالة الموجية للقطة الحية، وعندئذٍ يزول كلياً التداخل بين الدالتين الموجيتين للقطتين الميتة والحية. ويترتب على هذا أن النظام لا يبدي تداخلاً ميكانيكياً كمومياً ونجد إما قطة ميتة أو قطة حية، وليس تراكباً طريفاً لحالتين.

لكنْ ما هي الحالة التي نجدها؟ هل يصمت الميكانيك الكمومي عن التنبؤ بنتيجة تجربتنا؟ يظنّ الكثيرون أن فقدان السببية والحتمية، وهما دعامتا العلم والفهم، هو ثمن عالٍ جداً يجب دفعه، وبخاصة عندما تكون الحجةُ المقدَّمةُ ضدّه هي رأياً ووجهةَ نظرٍ فلسفيةٍ بدلاً من أن تكون رياضياتٍ متحالفةً مع التجربة. وقد برز حلٌّ ممكنٌ من اقتراحٍ قدّمهُ آينشتاين مفاده أن الميكانيك الكموميّ غير تام، بمعنى أنّ ثمة متغيراتٍ مخفيّةً hidden variables، أو سماتٍ مميِّزةً للجسيمات (تضم القطط) مستترةً عنا، لكنها، مع ذلك، تؤثر في سلوكها. وهكذا فقد يخبرُ متغيرٌ مخفيٌّ الجسيمَ بأن يندفع في موقع معين، في حين أنّ كلَّ ما استطاعتِ النظريةُ الكموميّةُ فعلَهُ هو التنبؤُ باحتمال ظهوره هناك. إن التّعامل مَعَ المتغيرات المخفية، والتنبؤ الدقيقَ بنتيجة مراقبةٍ بدلاً من مجرد معرفة احتمالها،

كانا مقبولين آنذاك بوصفهما مجالاً لنظرية عميقة لم تكتشف حتى ذلك الوقت يقوم عليها الميكانيكُ الكموميُّ.

إن تثبيت، أو عدم تثبيت، وجود متغيرات مخفية مؤثّرة لا يمكن معرفتها قد يبدو مسألة جدلٍ فلسفيٍّ أكثر من كونه قراراً علميًّا. لكنّ نشر بحث علمي بسيط واستثنائي، وإن كان جوهرياً، من قِبَلِ جون بِلْ (1928-1990) J. Bell عام 1964، بيّن أن ثمة تبايناً تجريبياً بين الميكانيك الكموميّ وتعديلاته التي كانت تتضمن متغيراتٍ مخفية، ومن ثَمَّ فإن من الممكن حل المسألة نهائياً وبحسمٍ. وعلى وجه أدق، أثبت بِلْ أن تنبؤات الميكانيك الكموميّ تختلف عن تنبؤات نظريات المتغيرات المخفية الموضعية local. المتغير المخفي الموضعي هو ما يدل اسمه عليه: إنه متغير مخفيّ يمكن تعرّفه مع الموقع الحالي للجسيم، الذي يبدو متطلباً طبيعياً لامتلاك خاصية. هذا ولا تلغي مبرهنة بِلْ Bell's theorem المتغيرات المخفية اللاّموضعية non-local، التي يتوقف فيها سلوك جسيم هنا على سمة مميزة متموضعة في مكان آخر؛ قد يبدو هذا إمكاناً غريباً، لكن النظرية الكمومية علّمتنا ألاّ نستبعد كل شيء غريب. إن مبرهنة بِلْ القوية هي نتيجةٌ نظريةٌ، لكنْ جرى اختبارها في سلسلة من التجارب المعقّدة. وفي كل حالة، كانت النتائج منسجمةً مع الميكانيك الكموميّ، وغير منسجمة مع نظرية المتغيرات المخفية الموضعية من أي نوع.

وهكذا، إذا كان الميكانيك الكمومي تامًّا حقًّا، على الأقل فيما يتعلق بالخاصيات الموضعية، فهل يتعين علينا التخلّي عن السببية؟ لقد اقتُرح عدد من البدائل. وأحد أكثر الاقتراحات راديكاليةً ـ لذا فهو يحظى باهتمام صحفيّ بالغ ـ هو الذي أعطيت له تسميةٌ غيرُ مناسبةٍ هي تفسير العوالم المتعدّدة many-worlds interpretation، وقُدِّمَ بصيغةٍ غامضة إلى حد ما من قِبَلِ شخص لا يغادر السّيجار شفتيه، ولا يسوق إلاّ سيارات الكاديلاك. ويملك الكثير من ملايين الدولارات نتيجة عمله في مجال الأسلحة، هو هُيُو إفيريت (1930-1982) H. Everitt، وذلك في رسالة الدكتوراه التي حصل عليها عام 1957. كانت الفكرة الصريحة، والحميدةُ ظاهريًّا في اقتراح إفيريت، التي هَزِىء منها بور، هي أن

معادلة شرودينغر سليمة وتتحكم في تطوّر الدوال الموجية حتى عندما يَتفاعل الجسيم مع جهازٍ للقياس. وقد بُنِيَ عددٌ من «القلاع الشاهقة» والملاحظاتِ من قِبَلِ معلِّقين على هذا الأساس الذي وضعه إفيريت فيما يتعلق بنتائجه الظاهرية[15].

إنّ القلعة التي استحوذت على التصور الشعبي هي أن جميع الاحتمالات التي يعبَّر عنها بالدالة الموجية محقّقةٌ فعلاً (لذا فالقطة، في الحقيقة، ميتة وحية)، لكن هذا التحقق يشطر العالَم إلى عددٍ غير منتهٍ من العوالِم المتوازية (أحدها فيه قطة ميتة، وفي آخر قطة حيّة) وذلك حالما يُجْرَى قياسٌ ويُجْرَى تصوّرُ الحالة. وخلاصةً، فإن تفاعل جهاز القياس مع دماغ المراقِبِ يختار فرعاً من العالَمِ ليتبعَهُ. كل مراقبة تشطر العالم، لذا ثمة قدر ضخم ومتزايد من العوالم المتوازية سلكتْ فيها الأدمغةُ مساراتٍ مختلفةً. من الصعب تصورُ تفسيرٍ أسوأ، لكنْ لمّا كان النفورُ ليس وسيلةً للتميّز العلمي، فبعض الناس يأخذون هذا التفسير على محل الجدّ. وخلافاً لمبرهنة بِلْ، يبدو أن لا وجود لطريقة لاختبار ما إذا كان العقل منشغلاً بالاستكشاف، باستثناء تجربة واحدة جرى اقتراحها. ولما كانت التجربة هذه تتطلب من المراقب أن ينتحر، فإنها لم تنفَّذ بعد.

علينا التمييز بين فكرة أساسية تبدو ظاهريًّا أنه لا يمكن استثناؤها، مفادها أن معادلة شرودينغر قابلةٌ للتطبيق على الأجسام الماكروسكوبية (العيانية)، وبين التفسيرات المستندة إلى هذه الفكرة، لذا يتعيّن عليْكَ أن تكونَ بالغَ الحذرِ عندما تحدِّدُ بدقّةٍ السِّمَةَ التي تعنيها في تفسير العوالم المتعددة، وذلك عندما تطلُبُ من أحدٍ أن يُبَيِّن لك ما إذا كانت هذه التفسيرات متعددة العوالم. وأظن أنّ من العدْلِ القولَ بأن معظمَ الفيزيائيين يقبلون الآن صيغة الفانيلا vanilla version لتفسير العوالِمِ المتعددةِ، التي مفادها أن معادلة شرودينغر شاملة، لكن قلةً منهم يقرّون بالنكهاتِ التي تتّسم بطابَعٍ ذاتيٍّ أكبر، والتي أضيفت إلى التفسير. هذا وإن «رؤية شرودينغر الشاملة» تتناقض مع

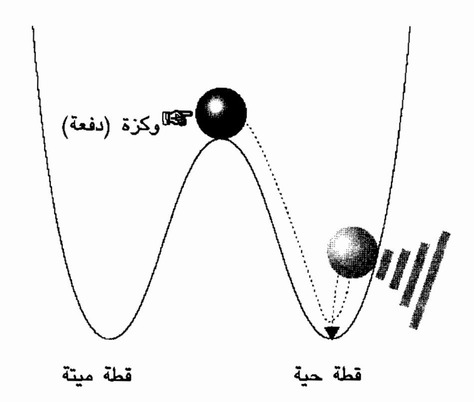
(15) كثير من التعليقات كانت تقترح وضع تسميةٍ أفضل لتسميته تفسير العوالم المتعددةِ.

تفسير كوبنهاغن، الذي يلحّ على الفكرة البغيضة التي تذهب إلى أن الميكانيك الكموميّ لا أساسَ له من الصحةِ إلى حدٍّ ما عندما يُطبَّقُ على التجمّعات الماكروسكوبية للذرّات، التي نسميها أجهزة قياسٍ. ويبدو هذا الموقف تخاذليًّا جدًّا، ومن الصعب رؤية كيف يمكن للميكانيك الكمومي أن يمتزج تدريجياً بنظرية أخرى، أو حتى أن يتحوّل إليها، مع ازدياد عدد الذرات الموجودة في النظام. والواقع قطعاً هو أن الأجسام الماكروسكوبية تتصرف، بتقريب جيد جدًّا، تصرفاً ينسجم مع الفيزياء التقليدية: لكننا نعرف أنّ ذلك التصرّف هو، ببساطة، جلاءٌ للميكانيك الكموميّ المطبَّق على عدد كبير من الذرات.

●

لنلتزم «بنظرة شرودينغر الشاملة»، ولننظرْ إلى نتائجها ومشكلاتها. فالاحتمال الذي يُتْرَك لنا أن أبسط السيناريوهات ملائم، ونعني به أن الميكانيك الكموميَّ تامٌّ، ولا وجود لمتغيراتٍ مخفيَّةٍ، وأنه يقدم وصفاً مستفيضاً لأجسامٍ مكوَّنةٍ من أيِّ عددٍ من الجسيمات. هذا وإن انهيارَ الدّالةِ الموجيّةِ، وهذا مكوِّنٌ غامضٌ لتفسير كوبنهاغن، محظورٌ، لأن معادلةً شاملة لشرويتكر يجب، بطريقة ما، أن تكون مسؤولةً عن جميع التغيّرات التي تحدث لدالة موجية، من ضمنها الانهيار الظاهريّ الذي يحدث في سياق قياسٍ. فكيف يمكننا، في ظلّ هذه القيود، الاحتفاظُ بمبدأي السببيّةِ والحتميّةِ ضمن إطار الميكانيك الكموميّ، وبخاصةٍ في عملية القياس؟

إن نجاح حلّ الترابط decoherence في إلغاء التداخل الميكانيكي الكموميّ بين القطط الحية والميتة يوحي بقوة أن حلّ الترابط هو الفارس المقدام الذي نحتاجه هنا أيضاً. إن قطة حيَّةً أو ميّتَةً هي قراءةُ موشرٍ معقدّةٌ. وإذا قبلنا بذلك، لنبسِّط المسألة بتصوّر جهازِ قياسٍ بدائيٍّ مؤلّفٍ من كرةٍ مستقرةٍ على ذروة حَدَبةٍ واقعةٍ بين بئريْن. إن أضعف دفعة للكرة تذهب بها إلى إحدى هاتين البئرين، وبمراقبتنا البئر التي ستذهب إليها الكرة، يمكننا الاستنتاج ما إذا كانت الوكزة الخفيفة للكرة كانت باتجاه اليمين أو اليسار (الشكل 7-13). الجهاز هو



الشكل 7-13. «مضخِّم الوكزة» الذي يمثل صورة مصغرة لمشكلة القياس في النظرية الكمومية. الكرة الموجودة في الذروة بين البئرين هي في حالة «استعدادٍ». فإذا دفعتْها وكزةٌ إلى اليمين، فإن عدم وجود احتكاك سيجعلها تتحرك جيئةً وذهاباً بين البئرين، وسنجدها في البئر اليسرى بنفس عدد المرات التي نجدها في البئر اليمنى. بيد أنه إذا كان الاحتكاكُ موجوداً (الذي يرمز إلى حلّ الترابط decoherence، والذي يُشارُ إليه بالشُّرُط bars في اليمين)، فإن الكرة ستستقر في البئر اليسرى، ويكون لدينا جهاز قياس قابل للتطبيق.

مضخِّم للوكزة، وهذا، في الحقيقة، هو السمة المميّزة الأساسية لجميع آلات القياس: فكلها مضخِّماتٌ للوكزات. وإذا توفرت لدينا الرغبة، يمكن أن نسمّيَ البئرَ اليسرى «القطةَ الميتةَ»، والبئر اليمنى «القطّةَ الحيّةَ». لذا فالقطة هي مضخِّمٌ للموقع ـ الرصاصة: وسأترك لك التحرّك بين مؤشر قطة شرودينغر وبين تبسيط ذلك بنموذجِ كرةٍ موجودةً على حدبةٍ.

وكما شرحنا حتى الآن، فإن الجهاز عديم الفائدة، لأن الكرة التي تتدحرج نحو الأسفل إلى البئر اليسرى ستتدحرج نحو الأعلى على الوجه المقابل، ثم تعود إلى الأسفل، ثم على الحدبة. وفي تلك الحالة فقط التي يُبَدِّدُ فيها الاحتكاكُ طاقةَ الكرةِ، فإنها ستستقر في البئر التي تدحرجت إليه في البداية. لذا فالاحتكاك يحجز الكرة في بئرها، ويمكّننا من فحص مُخْرَج الجهاز على مهل. لدينا الآن جهازُ قياسٍ قابلٌ للعمل، وقد جُعِلَ كذلك بواسطة الاحتكاك، وهو التفاعل بين النظام والبيئة.

الاحتكاك هو النظير لحلّ الترابط. (ويتضمن هذا التوكيد إيماناً من طرفك: ومرة أخرى، فأنا أحاول تفسير الصيغة الرياضيّة ولا أحاول تسويغ أي خطوة). يمكننا تصور كرة متدحرجة بصفتها جسيماً صرفاً من جسيمات شرودينغر، تتحكّم فيه معادلته. وبدايةً، فإن حالة جهاز القياس تتعلّق بالكرة المتوازنة على الذروة؛ ونسمي هذه الحالة استعداد الجهاز device ready. لنفترض أن الجسيم الذي صُمِّمَ الجهازُ لكشفه موجودٌ في حالةٍ هي تراكبٌ للتحرّك إلى اليسار - وهذا ما سنسميه جسيماً يسير إلى اليسار - وإلى اليمين - وهذا ما سنسميه جسيماً يسير إلى اليمين - عندئذ تكون حالة النظام قبل حادث الكشف هي:

الحالة الابتدائية = استعداد الجهاز × (جسيم يسير إلى اليسار + جسيم يسير إلى اليمين)

وحين يصدم الجسيمُ الكاشفَ تنتقل الكرةُ إلى تراكبٍ تكون فيه في البئرين اليسرى واليمنى، ومن ثم فإن:

الحالة النهائية = كرة في اليسار + كرة في اليمين

لكنْ لما كانت الكرةُ مرتبطةً بالبيئة بواسطة الاحتكاك، فثمة حلٌّ ترابطٍ سريعٌ جدًّا لهاتين الحالتين، ولن نلاحظ البتّة أيَّ تداخلٍ بينهما: ففي الواقع، تكون الكرة في اليسار أو تكون في اليمين - فالتراكب حُلِّل أساساً إلى حالتيْن تقليديتيْن.

مايزال هذا هو السؤال عمّا إذا كانت الكرةُ موجودةً في الواقع في البئر اليسرى أو في البئر اليمنى. علينا أن نتذكّر أن الكرة في حالة الاستعداد تكون متوازنةً بدقة على قمة الذروة، ومتوازنةً لتتدحرج في أي من الطريقين. وهذه طريقة أخرى للقول إن الكاشف حسّاسٌ جدًّا وليس منحازاً إلى جهة دون أخرى. والآن، علينا ألاّ ننسى أنه حتى الكرة ليست منفصلةً تماماً عن بيئتها، وأنها عرضة للاهتزازات، وصدماتِ الجزيئاتِ الهوائيةِ، ومسّ الفوتونات المارّة الشاذة، وغيرها. وعندما تصدم الجسيمات التي يجري استكشافها الكرةَ، وتستثير تدحرجَها إلى جهةٍ أو أخرى، فإنّ اتحادَ الصدمةِ التي تستثير الحركة إلى كلتا الجهتين باحتمال واحد، والاضطرابِ الموضعيِّ الذي يمكن أن يكون في أي اتجاه، يستثير الحركةَ باتجاهٍ محدَّدٍ. يترتب على هذا أن التراكبَ يتطوّر في الكرة

منتهياً بها إلى واحدةٍ فقط من البئرين. حيث تُحْتَجَزُ مباشرةً بواسطة حلّ الترابط.

لذا، ليست السّمة الأساسيّة لجهاز القياس هي ضرورة أن يكون جهازاً تقليدياً، حيث لا تسري معادلة شرودينغر (كما يتطلب تفسير كوبنهاغن)، بل ضرورة أن يكون جهازاً كمومياً ماكروسكوبيًّا مضموراً في بيئته.

●

لم أَقُمْ بأكثر من مسّ سطح سمات الميكانيك الكمومي (الكوانتي). ثمة كثير من الرسائل التي تلقيناها من عرضنا السابق له، وسأحاول إعادةَ عرضها هنا.

أولاً، سنتوقف عن التفكير في الأمواج والجسيمات بوصفها أشياء متمايزة، لأنه يمكن لكلٍّ منها أن تتّسم بسمات الأخرى. فإذا فكرنا بلغة الجسيمات، فإننا نُلزِمُ أنفسَنا بالتفكير في مواقعها. وإذا فكرنا بلغة الأمواج، فإننا نلزم أنفسنا بالتفكير في الأطوال الموجية، ومن ثم في الاندفاعات التي ترتبط بتلك الأمواج بعلاقة دو بروييل. ويعبِّر مبدأُ الارتياب عن هذه التكامليَّةِ الأساسيَّةِ بتحذيرنا أنّ تحديدَ خاصيّةِ جسيم (الموقع) يتداخل بتحديد خاصية موجة (الاندفاع). ولا يمكن تقديم وصف بسيط حتميٍّ للعالَمِ إذا استبعدنا أحدَ هذيْن النمطيْن من التفكير.

إن خاصّيّات الجسيمات (التي اتفقنا على تسميتها كينوناتٍ لها شخصية متقلّبة) تُعيَّن بحلّ معادلة شرودينغر. وتحتوي حلولُ هذه المعادلة كلَّ المعلومات الدينامية المتعلقة بالجسيم، مثل معرفةِ المكان الذي يُحتملُ العثور عليه فيه، أو تعيينِ السرعةِ التي يُحتمل أن يندفع بها. وتصف الحلولُ أيضاً جميعَ الملاحظات التي قادتنا إلى صوغ الميكانيك الكموميّ في المقام الأول، مثل انعراجِ الجسيماتِ، ووجودِ مستوياتِ الطّاقةِ المكمَّمةِ كما قدّمها بلانك في سياق إشعاع الجسم الأسود، وكما قدّمها آينشتاين في سياق الذّرّاتِ في الموادّ الصلبة. إن تطبيق معادلة شرودينغر - إيجاد حلولها، ومن ثم التنبؤ بخاصّيّات الأجسام -

يمكن تنفيذه آليًّا تقريباً، وما من شك في أن الميكانيك الكمومي هو نظرية موثوقة تماماً[16].

الميكانيكُ الكموميُّ موجودٌ في الحدود المشتركة بين المكرسكوبيّ (المجهري) والماكروسكوبيّ (العياني)، ذلك أنه يبدو أنّ حصيلةَ القياساتِ تجعلنا نقترح أنّ الميكانيكَ الكموميَّ هو احتماليٌّ كلِّيًّا وينبذ مبدأ الحتمية. هذا غير صحيح، فالدوالّ الموجيّة تنشأ بطريقةٍ حتمية كلِّيًّا وفقاً لمعادلة شرودينغر. المكان الذي تبدو الحتميةُ غائبةً فيه هو التنبؤ بنتيجة القياسات. أحد الحلول، وهو عدم تمام الميكانيك الكموميّ ـ بمعنى أن ثمة متغيرات مخفية موضعية تحكم النتيجةَ الحقيقيةَ لملاحظةٍ ما، لكنها غيرُ مرئيةٍ تحت سطح النظرية ـ فأمر يتعذر الدفاع عنه لأنه نظريةٌ متعارضة مع التجارب التي أُجريَتْ. ويلحّ تفسير كوبنهاغن على أنّ معادلة شرودينغر يجب أن يحلَّ محلَّها عمليةٌ غامضةٌ تسمّى انهيارُ الدالةِ الموجيّةِ. بيد أن أبعد الأشياء احتمالاً هو وجود مجالٍ يثبتُ فيه الميكانيك الكموميُّ كفاءته، التي تتلاشى عندما يصبح النظام أكثر تعقيداً. النظرة الحديثة هي أنّ معادلةَ شرودينغر صحيحةٌ في جميع الأحوال، وأنّ الآثارُ الدقيقةَ الناشئةَ من إدخال البيئة في الموضوع كافيةٌ لتفسير جميع الملاحظات. ومع ذلك، فثمة أناس يرفضون هذه الفكرة رفضاً قاطعاً. ويبدو أن مقولة ريتشارد فاينمان بأن «كل من يزعم بأنه يعرف النظريةَ الكموميَّةَ تماماً، فإنه لم يفهمها» هي مقولة صحيحة تماماً.

(16) إنه غير تام كما سبق ووصفناه، لأنه يقع خارج النسبية الخاصة. وقد دُمِجَتِ النسبيةُ الخاصّةُ بالميكانيكِ الكموميّ، ونتج منهما الميكانيكُ الكموميُّ النسبيُّ الذي أبدعه بول ديراك P.Dirac (1902-1984) عام 1927. أمّا دمج الميكانيك الكموميّ بالنسبيّة العامّة فلم يُنْجَزْ بَعْدُ (الفصل 9).



الفصل 8

الكُوسْمُولُوجْيَا (عِلْمُ الكَوْنِ)

عَوْلَمَةُ الوَاقِعِ



وهبَ اللَّهُ الإنسانَ مَلَكَةَ الكَلاَمِ، وولَّدَ الكلامُ التفكيرُ،
وهذا أحدُ مقاييسَ الكَوْنِ[1]
شيلي

غالباً ما يُعْتَبَرُ العِلْمُ متعجرفاً عندما يدَّعي لنفسه، كما يقول البعض (وأنا واحد منهم) أنه الطريقُ الوحيدُ للمعرفةِ الحقيقيّةِ الكاملةِ والشاملةِ. بَيْدَ أنّ بعضَ أعظمِ إنجازاتِهِ مُذِلٌّ جدًّا. ويتصدّر قائمةَ هذه الإنجازاتِ المهيبةِ، وإنْ كانت مُذِلَّةً، الدورُ الذي أدّاه العِلْمُ في وضعِ الإنسان في موقعه الصحيح في العالَمِ. ومن مآثرِهِ الرائعةِ قدرتهُ على انخراطه في أعظمِ مسألةٍ على الإطلاق، ألاَ وهي أصلُ الكون. ويتجلَّى الإذْلالُ الذي لا مفرّ منه في أنّ كلَّ ثورةٍ فلكيّةٍ وكوسمولوجيَّةٍ قَلَّلَتْ من تميُّزِ موقعِ الإنسانِ. فقد وضَعَنَا بطليموس في مركزِ الكونِ، أمّا كوبرنيك فَنَقَلَنَا إلى كوكبٍ جميلٍ، وإنْ كان صغيراً، يدور حول الشمس. ومنذ ذلك الوقت، بدأت الشمسُ، التي كانت تُعَدُّ مركزَ العالَمِ، تتراجعُ إلى موقعٍ متواضعٍ في مجرّةٍ عاديّةٍ في حَشْدٍ نجميٍّ متواضِعٍ، ينتمي، على ما يبدو، إلى كوْنٍ متواضعٍ.

(1) العبارة الدقيقة التي أوردها الشاعر شيلي Shelley هي Prometheus unbound بدلاً من universe.

يروي هذا الفصلُ قصّةَ هذا الإذلالِ المتعاقِبِ، الذي هبط بنا من المركزيّةِ، التي كانت تفترضُ الإنسانُ وجودَه فيها، إلى موقعنا الجانِبِيِّ الذي دفعتْنا إليه مكتشفاتُنا العلميّةُ، وفي الوقت نفسه، فقد أُجْبِرْنَا على قياس تفاهتنا، نحن ذوي الأدمغة الصغيرة التي اكتشفت مدى الكون، وعيّنت قياساً لكلِّ ما فيه، وحدّدت ما يبدو أنه أصْلُنَا، وأوضَحَتْ حتى التمدّدَ المحتملَ لمستقبلِ كونِنَا. لكنْ يحقّ لنا أن نكون فخورين بما توصّلنا إليه وسْطِ هذا الإذلال المتزايد الذي لا يتوقف.

●

في الفصول السابقة، كنا ننظر نحو الداخل؛ أما في هذا الفصل فسنوجّه أنظارنا إلى الخارج. كنّا سابقاً ننظر إلى أشياءَ لامتناهيةٍ في الصِّغر، أمّا هنا فننظر إلى أشياء لامتناهيةٍ في الكبر. نحن ننظر الآن إلى بقاعٍ مفتوحةٍ من السماء، لنرى أين يقع بيتنا الصّغير، ونتساءل عمّا يمكننا تعلُّمُهُ من النجوم.

لم تَنْجُ النجومُ من رصْدِ اليونان لها. ففي البداية، في تلك الأيام التي هي أشدّ ظلمةً من أيامنا الآن، كانوا يتطلّعون إلى السماء في الليل ويشاهدون درعاً تغشاه ثقوبٌ كان يسطع عِبْرَهَا ضوءٌ سماويٌّ لعالَمٍ خارجيٍّ لمّاعٍ. أصبحت هذه الرؤية للكون أعقدَ قليلاً، عندما ارتأى يِدُوكْسُسْ من سْنِيدُسْ E. of Cnidus، (408-355 ق.م) الجادُّ الذهن، أنّ هذا الدرع هو في الحقيقة سبعٌ وعشرون كرةً لها مركز واحد[2]. ومازال ثمة جدَلٌ يدور حول ما إذا كان يدوكسس اعتبر الكراتِ مجرّدَ جهازٍ للحسابات، أم أنه، مثل أرسطوطاليس، اعتبر الكراتِ حقيقيّةً، وزاد عددها إلى أربع وخمسين. ومن وجهة نظر أرسطوطاليس، أو برأي علماء متأخّرين فيما كتبه، فإن جميع الكرات، باستثناء أبعدها، كانت شفّافةً؛ فأبعد الكرات كانت سوداء، وعليها نقاط ضوئية مثبتة بها وتدور معها مرة كل يوم. ووفقاً لأرسطوطاليس، فإن الأجرامَ السماويّة، التي كانت موجودةً على الكرات، مصنوعةٌ من العنصر الخامس، وهو

(2) لمعرفة المزيد عن هذا الرجل الذكي يمكن الرجوع إلى الموقع:
http//www-groups.dcs des-st.and.ac.uk/history/Mathemticians/Eudoxus.html.

الجوهر quintessence، الذي ليس له مثيل على الأرض. قد نسخر من ذلك الآن، لكنْ يجب علينا التزام جانب الحذر، إذ إننا سنعود إلى الجوهر في نهاية هذه المناقشة. كانت الكرات السماوية مرئية إلى حد ما، لكنْ كان من الصعب آنذاك سَبْرُ أبعادها. وحتى يُوهَانْ كِپْلَرْ (1630-1571) J. Kepler كان يظن أن جميعَ النجوم واقعةٌ في صدفةٍ رقيقة سمكها لا يتجاوز بضعة كيلومترات.

بدأ تصوّرنا للكون بالاتساع عندما نظر إليه الإنسانُ بواسطة عدسَة محدَّبة، واستعمل معها مرآةً لها شكل قطْعٍ مكافىءٍ. وفي أيام السير وليام هيرشل (1822-1738) Sir W. Herschel ـ الذي بدأ حياته المهنيّة عازفاً على آلة الأُوبْوَا في الفرقة الموسيقية العسكرية في هانوفر، لكنه اشتهر وذاع صيته كفلكيٍّ برعاية شخصيةٍ أخرى من هانوفر، هو جورج الثالث George III ـ كان قد اكتُشِفَ حشدٌ من مئات آلاف النجوم له شكل يشبه حجر الرَّحَى، وهو يبعد عنا ستة آلاف سنةٍ ضوئية[3]. وهذه المسافةُ المتخَيَّلَةُ كَبُرَتْ بعد إتمام بناء برج إيفل، لا لأن الفلكيين صاروا قادرين على الوقوف على مكانٍ يعلو سطحَ الأرض، وأنّ رؤوسَهم أصبحت أقرب إلى السماء، لكن لأن المصاعد في البرج صُنِعتْ من قِبَلِ وليام هيل، الذي صار يملك من الثروة ما يكفي لإشباع شغف ابنه جورج هيل (1938-1868) G. Hale بعلم الفلك. لقد كان جورج في البداية مديرَ مرصد ييركس Yerkes التابع لجامعة شيكاغو، وقد سُمِّيَ المرصدُ بهذا الاسم تخليداً لاسم تشارلز ييركس C. Yerkes، الذي كان معروفاً بأنه جمع ثروةً من صناعة التّرام من شيكاغو، وبأنه فظٌّ وقاسي القلب. وأملاً منه في تحسين سمعته في المجتمع، بعد أن زُجَّ به في السجن بسبب عملية اختلاسٍ، فقد مَوَّلَ إنشاء أكبر مقرابٍ كاسِرٍ refractive telescope في ذلك الوقت (كان قطر العدسة متراً). وفي عام 1904، انتقل هيل إلى مرصد مَاوْنْتْ وِيلْسُونْ القريب من لوس أنجلس. وقد أدرك أنه بإضافته بضعة إنشاءاتٍ إلى المرايا، فإنه يصبح قادراً على الوصول

(3) السنة الضوئية هي المسافة التي يقطعها الضوء في السنة، علماً بأن سرعته تساوي 300000 كيلومتر في الثانية؛ لذا فالسنة الضوئية تساوي نحو تريليون كيلومتر (وتحديداً، 9.54×10^{11} كيلومتر).

إلى بقاعٍ في الفضاء تبعد عنا عدداً أكبر من السنين الضوئية. في البداية، ساعده والدُهُ على أن يتزوّد بمقرابٍ عاكسٍ reflecting telescope قطره 60 إنشاً (1.5 متر) هناك؛ ثم استطاع الحصولَ على مقرابٍ قطرُ عدستِهِ 100 إنش، بمساعدة قدّمها رجلُ أعمالٍ آخر، اسمه جون هوكر J. Hooker، وقد بُنِيَ هذا المقرابُ عام 1918، وبقي الأكبرَ في العالَمِ طوال ثلاثين سنة.

وفي عام 1919 أقنعَ هيل إدوين پاويل هابل (1953-1889) E. P. Hubble ـ الأستاذَ في أكسفورد الذي درس القانونَ، لكنْ تعبَ من متطلّباته ـ أن ينضمَّ إليه. بدأ هابل عملَهُ بتحديد المسافاتِ عن بعض اللطخات الضبابية النجمية ـ التي تُسمَّى الغيومَ السديميّة nebulae ـ والتي طالما حيّرت الفلكيّين. إن قياس المسافات التي تفصلنا عن الأجسام البعيدة ليس بالمهمّة السّهلة. وعندما قرّر هابل الانطلاق في عمله، كان ثمة طريقةٌ واحدةٌ للقياس، هي استعمال تقنيّةٍ اقترحتها هَنْرِييتْ لياڤيت H. Leavitt (1921-1868)، التي كانت تعمل في مرصد كلية هارڤرد. فقد لاحظتْ علاقةً بين سطوع brightness صِنْفٍ معيَّنٍ من النجوم المتغيّرة ـ التي تسمّى قِيفَاوِيَّةً Cepheid variable، والتي تقع في أذرع المجرّات اللّولبيّة (الحلزونيّة) spiral galaxies ـ وبين دَوْرِ period تغيّرها. ويتوقف السطوع الذي يقيسه الفلكيون على مسافة النجم عنا، فكلّما ازدادت المسافةُ، ازداد بُهُوتُ dimmness النجم. ومن ثَمَّ، فإن رصد دور النجم المتغير يسمح بالحكم على سطوعه المطلَق؛ وبقياسنا لسطوعه الظاهريّ، يمكننا استنتاجُ المسافةِ التي تفصله عنا. كانت نتائجُ هابل مدهشةً: ففي حين كان يُعْرَفُ أن لمجرّتِنَا، دَرْبِ التَّبَّانَةِ، قطراً يساوي زهاء 25 ألف سنة ضوئية، فإن أقرب هذه السُّدُم، وهو سديمُ المرأةِ المُسَلْسَلَةِ Andromeda، كان يبعد عنا مليوني سنة ضوئية. لذا كان من الضروري أن يكون خارج مجرّتنا؛ إذن فهذا السديم مجرّةٌ أخرى.

وفوْراً، أصبح تصوّرُنا للكون أكبرَ ممّا كنّا نؤمن به سابقاً، ثم إن حجم إذلالنا تزايد. فلم نعد نقبل أنّ موقعنَا غيرُ مركزيٍّ في نظامنا الكوكبيّ فحسب، وأننا محشورون في أحد جوانب درب التبانة، لكنْ أصبح واضحاً الآن أن مجرّتنا ليستْ سوى واحدةٍ من مئات آلاف المجرات الأخرى.

كانت مهمة هابل التالية تحديد السرعات التي تقترب بها هذه المجرات الأخرى منا أو تبتعد عنا، وهذا بدوره يُطْلِعُنَا على ديناميّة الكون. فهل كان، مثلاً، شبيهاً بغاز تنطلق فيه الجزرُ المجرِّيَّةُ بطريقةٍ عشوائيّةٍ، أمْ أنّ هذه المجرّات كانت معلّقةً في السماء؟ أمّا وجودُ حركةٍ فقد جرى اكتشافه سابقاً عام 1912 من قِبَلِ ڤيستو بأريزونا. فقد قاس الانزياحاتِ في ألوان المجرات، الناجمة عن حركتها، وبحلول عام 1924 اكتشف أن 36 مجرّة - من بين 41 مجرّة كان يدرسها - كانت تبتعد عنا. وقد استعمل سليفر مفعول دُوْپْلِرْ Doppler effect، وهو التغيرُ في الأطوال الموجية، الناجمُ عن حركة المنبع المضيء؛ فالحركة المتجهةُ نحونا تقلّل من طول الموجة التي نتلقّاها، جاعلةً اللونَ الأبيضَ يميلُ إلى الزّرقة؛ أما الحركةُ المبتعدةُ عنا فتزيدُ طولَ الموجة التي نستقبلها، جاعلةً اللونَ الأبيضَ يميل إلى الحُمرةِ. وهذا الأثر مألوف فيما يتعلق بالصوت، فعندما تقترب سيارةٌ متحركةٌ نحونا، فإن ضجيجها يصبح أعلى ممّا لو كانت مبتعدةً عنا. وينشأ هذا الأثر لأنّ حركةَ المصدر تساعدُ على أن تقرّبَ ذُرَا (جمع ذروة peak) الموجاتِ بعضها من بعضٍ، أو أن تُبْعِدَ بعضَها عن بعضٍ (الشكل 8-1).

الشكل 8-1. مفعول دوپلر هو تعديلُ طولِ موجةِ الإشعاعِ (سواءً أكان ضوءًا أمْ صوتاً) المنبعثِ من منبعٍ متحرّكٍ، والذي يتلقّاه راصدٌ ثابتٌ غير متحرك. في الشكلِ العلويِّ، المنبعُ غيْرُ متحرِّكٍ (مستقرٌّ)، ويُصدِرُ إشعاعاً ذا طول معيَّنٍ. وفي الشكل الأوسط، يتحرّك المصدرُ باتجاه الراصد، وتُضْغَطُ سلسلةُ الموجاتِ، لذا فإن الراصد يتلقّى موجةً أقصر طولاً، أو أعلى تردداً (تواتراً frequency (انزياحٌ نحو الأزرق، أو نحو علاماتٍ صوتيةٍ أعلى). وفي الشكل السفليِّ، يوم المنبعُ بالتحرّكِ مبتعداً عن الراصد، ومن ثَمّ تتمدّد الموجاتُ نتيجةَ الحركةِ، ويتلقّى الراصدُ موجةً طولها أكبر، أو تردّدها أخفضَ (انزياحٌ نحو الأحمر، أو نحو علاماتٍ صوتية أخفض).

وكلّما ازدادتْ سرعةُ المصدر، ازداد الانزياح في الطولِ الموجيِّ، ومن ثَمَّ يمكننا، بواسطة قياس الانزياحات، أن نحدّدَ السرعةَ النسبيّةَ للجسم المتحرك. فإذا ازداد طولُ الموجة، مولِّداً ما يُسمَّى الانزياحَ الأحمرَ red shift، فإن المصدر يبعد عن الرّاصد. هذا وإن ضوء معظم المجرّات يُحْدِثُ انزياحاً أحمرَ، لذا فهي تتحرك مبتعدةً عنا.

ذهب هابل إلى أبعد من ذلك. ففي الأعوام 1923-1929 توصّل إلى النتيجة المذهلة، وهي أن سرعة التراجع تتناسب طرديًّا مع المسافة التي تفصلُ الأجسامَ المتحركةَ عنا، وأنه كلّما كانت المجرّةُ أبعدَ عنا، ازدادتْ سرعةُ تراجعها. ويعبَّر الآن عن هذه الملاحظة بقانونٍ عامٍّ للكون هو:

سرعةُ التراجع = ثابت هابل × المسافة التي تفصلها عنا

ويحدَّدُ ثابتُ هابل بحيث إنّ مجرةً تبعد عنا 10 ملايين سنة ضوئية تبدو متراجعةً عنا بنحو 200 كيلومتر في الثانية، وأن مجرّةً تبعد عنا 20 مليون سنة ضوئية تبدو متراجعةً عنا بزهاء 400 كيلومتر في الثانية، وهكذا[4].

ومع أن هابل نسيَ ذكرَ نتيجتِهِ في أوْلِ بحثٍ قدّمه، فقد بيّنتْ هذه النتيجةُ أن الكونَ آخذٌ في التوسّع. وكلُّ مجرّةٍ تشبه نقطةً على ملاءةٍ مطّاطيّةٍ. ويمكنكَ التفكيرُ في المجرّات بأنها قِطَعٌ نقدية صغيرةٌ مثبَتَةٌ على سطحِ منطادٍ مطّاطيٍّ : فكلّما انتفخ المنطاد ابتعدت القطعُ النقديّةُ بعضُها عن بعض، لكنها، نفسها، لا تتمدّد (الشكل 8-2). إن لهذا التوسّع عاقبةً مروِّعةً، لأننا إذا عدنا بالزمن إلى الوراء، فلا بدّ من ورود لحظةٍ تنضمّ فيها القطع النقدية بعضُها إلى بعض، ويصبحُ الكونُ نفسُهُ نقطةً وحيدةً. وهذا يعني أنّ الكونَ يبدو وكأنه كان لهُ بدايةٌ. لقد أوردتُ الكلماتُ المراوغةَ «يبدو وكأنه كان له»، لأنَّه مَا مِنْ شيءٍ في الكوسمولوجيا مؤكَّدٌ تماماً، وبخاصةٍ في الزمكان المقوَّس، وأنا بحاجةٍ إلى التوسّع

(4) تحديد ثابت هابل عمليةٌ تعتريها صعوباتٌ جمّةٌ. وقد غالى هابل نفسه في تقديرها كثيراً، واستنتج، مُجانباً الصّوابَ، أنّ الأرضَ أقدمُ من الكون. القيمةُ المقبولة حاليًّا لهذا الثابت قريبةٌ من $71 = 7 kms^{1} Mpc^{1}$، وهذا يساوي نحو $22 kms^{1} M1y^{1}$ (1y يساوي مليون سنة ضوئية) أو $2.3X10^{15} s^{1}$.

الشكل 8-2. نموذجٌ يشير إلى كيف يمكننا التفكير في كونٍ آخذ في التوسّع. وتمثّل القطعُ النقديةُ المثبّتةُ بسطح الكرة المجرّاتِ. وخلال توسّع الكون ـ الممثّل بالكرة المتوسّعة ـ تتحرّك المجرّاتُ مبتعدةً عنا، لكنها، ذاتها، لا تتوسّع. ووفقاً لهذا النموذج، فإن راصداً واقفاً على أيّ قطعةٍ نقدية سيَرَى القِطَعَ النقديةَ الأخرى مبتعدةً عنه: ولا يستلزم تراجعُ المجرّاتِ أن نكون موجودين في موقعٍ خاصٍّ في الكون.

في هذه النتيجة في وقتٍ لاحقٍ. ومع ذلك، ففي هذه المرحلة، يمكننا التفكيرُ في إحدى نتائج الفكرة العظيمةِ القائِلة إنّ الكونَ يتوسّع، وكأنه كان ثَمَّةَ لحظةٌ بدأ فيها كلُّ شيءٍ.. هذا، في الحقيقة، شيء غايةً في الإثارة، وهو يفتح البابَ لجميعِ أنواع الأسئلة، التي سنناقش بعضها في هذا الفصل، مثل انتشار الكون[5].

ثمة مظاهرُ مختلفةٌ لهذا الوصف الذي يجب علينا العودةُ إلى بعضِه الآن، وإلى البعض الآخر في وقتٍ لاحقٍ، فأينما وجّهنا مقاريبَنَا، نرى المجراتِ تتراجع عنا خلال توسّع الكون، لكن هذا ليس صحيحاً تماماً، إذ إن بعض المجرّات القريبة منا ـ المرأة المسلسلة، مثلاً ـ تتحرك باتجاهنا، وهذا يهدّدنا إلى حدٍّ ما. وتسمَّى هذه الحركةُ «الموضعيَّةُ» حركةً غريبةً peculiar motion للمجرةِ، وهي حركةٌ تجري بالنسبة إلى مجموعةٍ مرجعيّةٍ للفضاء المتوسّع. ويمكننا التفكيرُ في المجرّاتِ بأنها تتجوّل عبر الفضاء، ويؤثّر بعضُها في بعض بواسطة الجاذبية[6]. وفيما يتعلق بالمجرّاتِ القريبِ بعضها من بعض، فإن هذه الحركةَ يمكن أن

(5) خلال الوقت الذي تستغرقُهُ في قراءةِ هذه الحاشيةِ ـ وربّما كان ذلك 10 ثوانٍ ـ فالمسافة الفاصلةُ بين مجرّتيْن، تبعد إحداهما عن الأخرى مليون سنة ضوئية، ستزداد بنحو 200 كيلومتر.

(6) إن عدداً كبيراً من المجرّات، ومن ضمنها مجموعتنا المحلّيّة (درب التّبّانة، والمرأة المسلسلة، وعددٌ قليلٌ من مجرّاتٍ صغيرةٍ أخرى) تتحرك جميعاً نحو نقطةٍ في الفضاء تُعرفُ باسمٍ مُبْهمٍ هو الجاذب العظيم Great Attractor، وهو منطقة في الفضاء تبعد نحو 150 مليون سنة ضوئيةً، وكتلتها تعادل 50 ألف تريليون كتلة شمسيّة. سنستغرق وقتاً طويلاً للوصول إلى هناك، لأننا نتحرّك نحوها بسرعةٍ لا تتجاوز 600 كيلومتر في الثانية.

تتغلّب على التوسّع الكونيّ، تماماً مثلما تنزلق قطعتان نقديّتان على ملاءةٍ مطّاطيّة مقتربتيْن إحداهما الأخرى، برغم تمدُّد المطّاط.

النقطة الثانية بهذا الخصوص هي أنّ التمدّد الذي نرصده يبدو وكأنه سيضعنا في مركز الأشياء، حيث تقوم كلّ مجرّةٍ بالابتعاد عنا. وتجدر الإشارة إلى أنه حيثما كنّا في الكون، فإننا سنرى أيضاً أن التوسّع يحدث بالابتعاد عنا، والشَّبَهُ الذي قدّمناه، والذي كانت فيه قطع نقديّةٌ ملصقة بمنطادٍ، يُبيّن ما يحدث: فمهما كانت القطعة التي نقف عليها، فإننا نرى منها القطعَ النقديّةَ المجاورةَ تتراجع عنّا. هذه الملاحظةُ هي جوهر المبدأ الكوسمولوجيّ cosmological principle، الذي يؤكّد أنّ العالَمَ يبدو بنفس الشكل حيثما وجد راصدٌ لهذا العالَمِ. وهكذا فالإذلال يعود مرة أخرى.

ثمة نقطةٌ تقنيةٌ أخرى قبل أن ندخلَ في موضوعنا. لم يكنْ هابل مصيباً تماماً في تفكيره أنه كان يقيس سرعةَ تراجع المجرّات. يمكننا تفسير الانزياح الأحمر بأنه مفعول دوبلر، ومن ثَمَّ بأنه دلالةٌ على سرعة جسمٍ متراجعٍ، وذلك فقط للأجسام القريبة منا. فالضوء الوارد من أجسامٍ بعيدةٍ جدًّا، ينطلقُ في رحلته قَبْلَ زمنٍ طويلٍ؛ ويكونُ الكون قد توسّع منذ ذلك الوقت، كما تكون موجات الضوء قد تمدّدت. إن التفسير الصحيح للانزياح الأحمر، الذي يوَلِّدهُ كلٌّ من الأجسام القريبة والبعيدة جدًّا، هو أنه قياسٌ للتغيّر في مقياسِ change in scale الكونِ الذي حصل بين الوقت الذي صدر فيه الضوء والوقت الذي اكتُشِفَ فيه. لذا فإذا انزاح الطّولُ الموجيُّ نحو الأحمر بفعل عاملٍ ما، فهذا يعني أن الضوء بدأ رحلتَه عندما كان الكوْنُ أصغر كثيراً. وإنّها لَحَقِيقَةٌ استثنائيةٌ أنه عندما نوجه انتباهنا إلى المسافة، نرى الكون كما كان عندما كان قياسُه أصغرَ ممّا هو عليه الآن.

●

وإذا تحركتِ المجرّاتُ بسرعاتٍ ثابتةٍ، فيمكننا استعمالُ ثابت هابل لنعرف متى

كان العالَمُ المرئيُّ كلُّه نقطةً وحيدةً. ويتعيّن علينا العودةُ إلى هذه النقطة في وقتٍ لاحق، لكننا الآن في موقع جيد للبدء بها. وعلى هذا الأساس، يمكن تحديد بداية العالم قبل نحو 15 بليون (مليار) سنة. والحدثُ الذي كان علامةً على بداية العالَمِ سُمِّيَ الانفجارَ العظيم big bang من قِبَل الفلكي البريطاني فْرِيدْ هُوْيْل H. Hoyle (2001-1915) وذلك في سياق برنامجٍ إذاعيٍّ بُثَّ عام 1950. وقد استعمَلَ هويل المصطلحَ مستخِفًّا به[7]، لأنه فضّل نظرية الحالة المستقرة steady-state theory للكون التي مفادها أن الكثافة المتوسطة للمادة لا تتغير مع الزمان والمكان بالرغم من توسّع الكون - وهذا يقتضي أن تكون المادة في حالة خلق مستمر. إن المعدّل المعروف لتوسّع الكون - المقبول في نظرية الحالة المستقرة - لا يحتاج إلاّ إلى خلق قدر ضئيل من ذرات الهيدروجين في كلّ متر مكعب من الفضاء كلّ 10 بلايين سنة، ومن ثم فإن المقادير اللازمة من المادة، أياً كانت طريقة خلقها، ليست كبيرةً جدًّا. وفي الحقيقة، فمن الممكن التفكير حتى في أن إجهاد stress الفضاء المتوسّع يولّد الذرات. لذا فإن خلق المادّة ليس سخيفاً بداهةً a priori؛ لكنّ توليدَ الجسيمات يبدو تخلِّياً عن قانون انحفاظ الطاقة.

كان هويل منجذباً إلى نظرية الحالة المستقرة كي يتحاشى مشكلةَ تحديد ما حدث في البداية، لأنه لم يكن ثمة بدايةٌ: لقد كان العالَمُ موجوداً دوماً، وكان دائمَ التوسّع. كان يتحاشى أيضاً الحاجةَ إلى طرح السؤال، الذي هو حتى أكثر إثارة للذهول، المتعلِّقِ بما كان يجري قبل أن يوجَدَ العالَمُ. لكنّ تحاشي الأسئلة ليس تسويغاً لتقديم أيِّ نظرية؛ وفي الحقيقة، فهو تبسيطٌ ظاهريٌّ فقط، لأنه يمكن النقاش في أن فهمَ السبب في أنّ العالَمَ كان دائماً موجوداً، أصعبُ من إيجاد آلية بدائية. وعموماً، فإن سلاسلَ السببيّة أكثرُ استساغةً للعلماء من محاولتهم للتأمل في الأبدية.

إن نموذجَ الحالة المستقرة للكون، الذي ابتكره هيرمان بُوْنْدِي H. Bondi وتوماس غولد T. Gold، كلٌّ على حِدة، ونشره في بحثَيْن علميَّيْن عامي 1948

(7) قال هويل «إن فكرة الانفجار العظيم big bang هذه تبدو لي غيرَ مُرْضِيَةٍ... لأننا عندما ننظر إلى مجرّتنا، دربِ التّبّانة، فلا يوجد أدنى إشارةٍ إلى أن مثل هذا الانفجار حصل.

وَ1949، لم يَعُدْ مقبولاً الآن من قِبَلِ الأغلبية العظمى من العلماء. وكما هو الحال مع نموذج هويل نفسه، فقد أُهمِلَ هذا النموذجُ. ومع ذلك، فيجب ألاّ نستغربَ استبعادَهُ بسرعة: إذ سنرى في وقتٍ لاحقٍ أن التفكيرَ الحاليَّ عاد إلى شكلٍ أكثر تعقيداً تبرز فيه جميع العوالم إلى الوجود بوتيرة حتى أعلى من بروز قدْر قليلٍ من ذرات الهيدروجين الذي تتطلبه نظرية الحالة المستقرة.

في الحقيقة، ثمة قدر كبير من الأدلة التي تدعم نموذج الانفجار العظيم، أهمّها وجودُ إشعاعِ الخلفيّةِ الكونيِّ cosmic back ground radiation وخاصيّاته، الذي سنشرحه قريباً. ويشكّ الآن قلّةٌ من الكوسمولوجيين في أن الكون المبكِّر مرّ بمرحلةٍ كان فيها كثيفاً جدًّا أو حارًّا جدًّا. وفي الحقيقة، فمن خلال اتّحاد استثنائي للنظرية والرصد، واعتماداً على معرفتنا لما هو بالغٌ في الصّغر لشرح ما هو بالغٌ في الكبر، يمكننا بقدرٍ معقولٍ من الثقة أن نتعقّب قصّة الكون بالعودة بالزمن إلى الوراء، وصولاً إلى جزءٍ جدٍّ صغيرٍ من الثانيةِ بعد ولادته. هذا وإن التراثَ الفلكيَّ لِهَابِلْ هو اكتشافُه التجريبيُّ لتوسّع الكون؛ بيْد أن تراثه الفكريَّ أكبر، إذْ بيّن لنا، أن بمقدورنا، نحن الأقزام، أن نعود بتاريخنا إلى الوراء وصولاً إلى بدء الزمن تقريباً. إن تراثه الفكريّ هو الذي سنكتشفه فيما تبقّى من هذا الفصل، وسنرى أن الأفكارَ العلميّةَ التي تنشأُ من مختبراتنا الصغيرة قادرةٌ على أن تحيط بالكون كله.

●

إن فكراً متّقدَ الذكاء قادرٌ على أن يرى بلمحةٍ واحدةٍ أنّ الكون قد توسّع. ففي عام 1826، استطاع الفلكيُّ والطبيب الألماني هِنْرِيش وِلْهِلْم أُولْبِرْس H.W. Olbers (1840-1758) أن يرى بنظرة عَجْلَى أنّ الكون كان يتوسّع، لكنه لم يدركْ أهمية هذا الذي رآه. وقد طرح سؤالاً يُعرَف الآن باسم محيِّرة أولبرس Olbers' paradox ـ مع أن السؤال كان معروفاً منذ أيام كبلر ـ اقترح له حلاً عام 1610. لقد أشار أولبرس إلى أن من الطبيعي أن نَحَارَ في حقيقة كون السماء مظلمةً في الليل. أنت وأنا، اللذان نملك عقليْن غير مدرّبيْن، قد نظن أن الجواب واضح: لقد

غابت الشمس. لكن أولبرس ذكّر الناسَ أنه لو كان الكونُ غيرَ منتهٍ وأبديًّا، فعندئذٍ إذا رسمتَ في أي مكان خطًّا مستقيماً من عيْنِكَ، وكان المستقيم طويلاً جداً ليصل إلى السماء، فإنه سينتهي بنجم. لذا فإن السماء الليلية يجب أن يكون سطوعها كسطوع سطح الشمس، لأن السماء فعلياً هي ملاءة من الشموس التي تغطّي السماوات. ومع أن شمسنا قد تغرب، فإن مئات الآلاف من الشموس الأخرى لا تفعل ذلك.

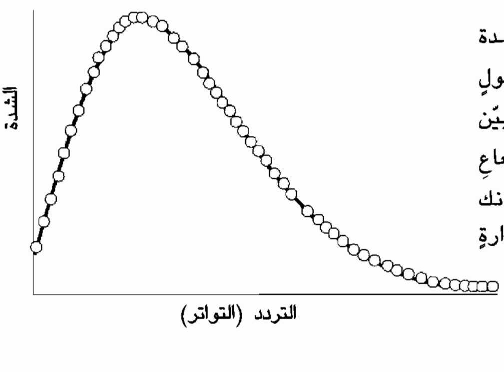
ثمة نقطتان يجب النظر فيهما. أولهما، وأبسطهما، هي أنه لو كان الكون قد نشأ قبل وقتٍ منتهٍ، لسقطت حجّةُ أولبرس، لأنه لم يكن ثمة وقت للضوء الصادر عن النجوم البعيدة جدًّا كي يصلنا. لذا، فبدلاً من أن تكون السماء ملاءةً من الضوء الشمسي، فإن هذه الملاءة تحوي ثغراتٍ، وبسبب كون النجوم بعيدة جداً، فلن تُسهم هذه النجوم في إضاءة سمائنا الليلية.

النقطة الثانية أكثر تعقيداً، وتخفّض بقدرٍ أكبر من شدة الضوء، الذي نتوقع وصوله إلى أعيننا حتى لو كان الكون منتهياً. عندما ننظر في المسافة فنحن ننظر عائدين بالزمن إلى الوراء، لأن الزمن بحاجةٍ إلى وقتٍ للوصول إلينا. ونحن نرى ماذا كان يحدث في المكان عندما غادره الضوء، لا ماذا كان في ذلك المكان عندما يصل الضوء إلى عيوننا. وحتى قراءة هذه الصفحة هي جزء من التاريخ، لأنك تنظر إليها كما كانت قبل واحد في البليون من الثانية (10^{-9} ثانية، أو 1 نانوثانية)، لا كما هي في هذه اللحظة. ومعظم مشاهدي الألعاب الرياضية يرونها كما كانت قبل مكروثانية، لا كما هي في اللحظة التي سُجِّلَ فيها هدف بل قبل نحو مكروثانية من ذلك. وفلكيًّا، فإن الأجسام البعيدة أصدرت الضوء الذي يصلنا الآن قبل بلايين السنين، حينما كانت حرارة الكون عالية ومن ثَمَّ كانت السماءُ كلُّها تتلألأ بشدة بضوء الشمس. وعند النظر آخذين في الاعتبار المسافات الهائلة والعودة بالزمن إلى الماضي السحيق، فسنتوقع، مثل أولبرس، أن نرى السماء مغمورةً بالضوء. بيد أنه منذ ذلك الوقت، توسّع الكون، ثم إن الموجات الضوئية، التي كانت مثاليّةً لجسمٍ حرارتُهُ قرابة 10 آلاف درجة (10^4 درجة كلفن)، قد

تمددت تمدّداً هائلاً. وبدلاً من أن تكون الأطوالُ الموجيّةُ مقيسةً بالنانومترات ومرئيّةً، فقد أصبحتْ أطوالاً موجيَّةً تُقاس بالمليمترات وغيرَ مرئيّةٍ. وتلك الأمواجُ هي الآن مميِّزةٌ لجسمٍ أبردَ بكثيرٍ، جسمٍ درجة حرارته زهاء 3 درجات فوق الصّفر المطلق (3 درجات كلڤن). لذا، فالسماء في الليل تتلألأ بشدةٍ قريبةٍ من شدة تلألؤ سطح نجم، لكنها تتلألأ بضوء نجمٍ قديمٍ جدًّا ومتمدِّدٍ جدًّا، وهذا يجعلنا نعتبر السماءَ مظلمةً.

وقد عثر العلماء على هذا التفسير عندما ترسّخ نموذج الانفجار العظيم الساخن بوصفه احتمالاً نظريًّا. واستناداً إلى هذا النموذج، جرى التنبّؤ أيضاً بأن درجة حرارة الكون يجب أن تتدنّى مع تمدّدِهِ لأنّ الأطوالَ الموجيّةَ للإشعاعِ الذي يملأ الفضاءَ كلَّه تمدّدتْ. ونتيجةً لذلك، فإن ما كان قصيراً في وقت من الأوقات أصبح طويلاً، ثم إنّ كثافة الطاقة في الكون انخفضت. وقد تبيّن أن درجة الحرارة تتناسب عكسيًّا مع قياس الكون، لذا فعندما يضاعِفُ الكونُ حجمَهُ، تنخفضُ درجةُ حرارتِهِ إلى نصف قيمتها السابقة. وقد بُذِلَتْ جهودٌ جبّارةٌ لاكتشاف بقية إشعاع الانفجار العظيم، لكنّ اثنين من طلبةٍ ما بعد الدكتوراه توّجا هذه الجهود، هُمَا آرنو بِنْزِيَاسْ A. Penzias (وُلِدَ عام 1933) ورُوبرت وِيلْسُونْ R. Wilson (وُلد عام 1936)، اللذان كانت مهمّتُهما تنظيفَ الهوائيِّ المكرويِّ الموجة الضخمِ من رَوْثِ الحَمَام. لم تكن هذه مهمتَهُمَا الوحيدةَ، بل كانا فلكيَّيْن رَادْيَوِيَّيْنِ radio-astronomers يديران هوائيًّا يصبح فائضاً عن الحاجة إليه حالَ الاستعاضة عن نظامِ بثِّ السَّاتِلِ الابتدائيّ المسمَّى Echo بالسّاتل التّلفزيونيّ Telstar، أملاً في استعماله في مسائل أساسيّة في الفلك الراديويّ. ثم إنهما كانا يبحثان عن مصدرِ الضجيج الخفيف (الهسهسة) الذي كان يُؤثر سلبيًّا في الاستقبال. وبعد إلغاء جميع المصادر الأرضية، التي كانت تتضمّن إزالةَ روث الحَمَامِ، وإدارة ظهرهما إلى مانهاتن، توصّلا إلى النتيجة التي مؤدّاها أن الإشعاعَ كونيٌّ بطبيعته. لقد عثرا على بقايا الكرة الناريّة، وإشعاعِها المتألق المنتشر بأمواج مكروية، وعلى هديرها الكهربائي الصاخب الذي خمد ليصبح هسهسةً إلكترونية صامتة تقريباً.

لقد بيّنتِ الدراسةُ المستفيضةُ لإشعاع الخلفيةِ الكرويِّ الموجةِ، وذلك خلال السنوات التي أعقبت هذا الاكتشاف، أنه، كما كان متوقّعاً، الإشعاعُ الذي يبثه جسمٌ درجةُ حرارتِهِ 2.728 فوق الصفر المطلق (أي قرابة 270 درجة سلسيوس، الشكل 8-3). وإذا ما سَلَّمْنَا بحركتِنا حول الشمسِ، وحركةِ الشمسِ حول مركز مجرّتنا، وبالاندفاع الكلِّيِّ لمجموعتنا المحلّيّة من المجرّات باتجاه الجاذب العظيم Great attractor، فإن الإشعاعَ يكونُ هو ذاته بأيِّ اتجاهٍ وجَّهْنَا نظرَنَا إليه. إنه منتظمٌ مقربًّا إلى واحدٍ في المئة ألف، وله سماتٌ مميِّزةٌ تستبعد مجموعةً من الاقتراحات الأخرى قُدِّمَتْ لتحديد أصله من قِبَلِ أولئك الذين لا يستسيغون حدوث انفجارٍ عظيم حارٍّ. لا شك في أنّ العَالَمَ كان في وقتٍ من الأوقاتِ شديدَ الحرارةِ وعالِيَ الكثافةِ.



الشكل 8-3. من الممكن قياس شدة الإشعاع الذي يملأ الفضاء الحاليّ بكلِّ طولٍ موجيٍّ، وتبيّن النقاطُ القيمَ الحاصلةَ. ويبيّن المنحني الشدةَ التي يتنبأ بها قانون إشعاعِ الجسم الأسود الذي وضعه ماكس بلانك M. Planck (الفصل 7) لجسمٍ بدرجةِ حرارةٍ قدرها 2.728 كلفن.

يمكننا الجمعُ بين الرّصد والنظرية معاً عند هذه النقطة، واستنباط تاريخ مختصر. نحن نعلم (عن طريق حلِّ معادلاتِ آينشتاين، ووصفِهِ الرياضيِّ للحقلِ التجاذبي بوجود أجسام بالغة الكبر، الفصل 9) كيف سيتغيّر قياس الكون مع الزمن عند توفر فرضيّاتٍ معيّنةٍ عن كمية المادة التي يحويها. نحن نعلم المعدّلَ الحاليَّ للتوسّع، وذلك من تحديدنا لثابت هابل، ونعرفُ علاقةَ درجةِ حرارةِ الكونِ بقياسِهِ. تُرَى، كيف نعرفُ ذلك؟ إن شدة الإشعاع في درجاتِ حرارةٍ مختلفةٍ يتوقّف على درجةِ الحرارة (تَذَكَّرْ ما أوردناه عن إشعاع الجسم الأسود في الفصل 7، والشكل 8-3)، وإن الأطوال الموجية تتمدّد مع تمدّد الكون، ومن ثَمّ

توجد علاقةٌ بين درجة الحرارة والقياس. وبدمج علاقةِ درجةِ الحرارةِ بالقياسِ وعلاقةِ القياس بالزمن، يمكننا التوصّل إلى الطريقة التي تتغير بها درجة حرارة الكون مع الزمن.

يمكن السّير بهذه الرابطة مسافةً أبعد، لأننا نعرف بناءً على التجارب التي نجريها في مختبراتنا كيف تُحدِثُ الحرارةُ التغيُّرَ. نحن نعرف كيف أنّ حرارة الكون ـ الذي كان أتُّوناً كونيًّا، ثم فرناً، ثُمَّ ثلاجةً (برّاداً) في وقتٍ لاحقٍ ـ تغيّرت مع الزمن، لذا فلدينا وسيلةٌ نستنتجُ بواسطتها كيف أن خاصّيّاتِ الكونِ تغيّرتْ بعد وقتٍ قصيرٍ من بدايته. ويمكننا القول عموماً إن تأثير الحرارة التي كانت ترتفع تجلّى بفصل بعض الأشياء، فالجسيمات المتّصلة بإحكام قادرة على الاستمرار في درجات حرارة عالية، لكن الجسيمات، المرتبطة بعضها ببعضٍ ارتباطاً ضعيفاً، لا تستطيع البقاء إلاّ في درجات حرارةٍ منخفضةٍ. ونحن نستعمل هذا المبدأ في مطابخنا، حيث يساعد القَلْيُ والسَّلْقُ على تجزئةِ الموادّ إلى جزيئاتٍ أصغر منها تسهّل عملية الهضم، وتمنح الطعام رائحةً زكيةً؛ ويساعد التجميد على حفظ الجزيئات عن طريق إبطاء التفاعلات التي يَنتج عنها تفسّخ الموادّ. ولدرجة حرارة الكون وظيفة شبيهةٌ بوظيفة المطبخ، لكن المواد التي نطبخها في الفرن الكونيّ هي المادة ذاتها.

وقد أوردنا في فقرة سابقةً عبارةً مراوغةً تحتاج إلى تفسيرٍ. فعندما نَحْصُرُ الكونَ المرصودَ حاليًّا في منطقةٍ قطرها يساوي عدداً يُسمّى طول بلانك Planck length ـ هذا القطرُ أقلُّ قليلاً من واحد من 200 بليون تريليون، تريليون من المتر (أي 1.6×10^{-35} متر، وهذا مقدار أساسيٌّ سنقابله ثانيةً في الفصل 9) ـ فإن فيزياءنا الحالية تتداعى وبغية تفسير بعض الأحداث عندما كان الكون مدمجاً إلى هذه الدرجة من الصِّغَرِ، فنحن بحاجةٍ إلى نظريةٍ للجاذبيّة للثقالة. وقد بدأت هذه النظرية بالبروز، لكنْ لا يوجد لدينا ثقةٌ كبيرة بها، ومن ثَمَّ فإنني سأستبعد هذا العَصْر الكوانتيّ البالغ القِدَمِ من تاريخنا، وسنتطرّق إليه، مستقلاً عن غيره، في وقتٍ لاحقٍ. هذا وإن عودتنا بالزمن إلى الوراء ناتجٌ من

جهلنا بزمن بلانك Planck time الذي يعادل نحو 5.4×10^{-44} ثانية بعد بداية الكون، عندما كان للحرارة قيمةُ بلانك التي تبلغ قرابةَ 1.4×10^{32} درجة. كان هذا قَبْلَ زهاء 15 بليون (مليار) سنة: وهذا عهدٌ قديمٌ جدًّا لا قِبَلَ لنا بتصوّره. ومن المثير للدهشة أنْ يحدثَ كلُّ هذا في مثل هذا الوقت القصير. لا يمكننا، كالقسِّ أشّر Ussher وتحليله المتّسم بالاهتمام البالغ بالتفاصيل للإنجيل، أن نعيّن لذلك تاريخاً دقيقاً مثل 23 تشرين الأول/أكتوبر عام 4004 قبل الميلاد، ظهراً، وذلك وقت تناول طعام الغداء(8)، لكن الدقّة في تحديدنا لبداية العالم آخذة في التزايد، وذلك تماشياً مع فهمنا لديناميَّاتِ تطوُّرِ كونِنَا، ويمكننا أن نأمل في أن نتمكّن بسرعةٍ من تحديد البداية مقرَّبةً إلى بليون سنة، أو قريباً من ذلك.

ثمة نقطة أخرى نحن بحاجةٍ إلى معالجتها. يُطرَحُ أحياناً السؤال عن مكان حدوث الانفجار العظيم. الجوابُ جِدُّ بسيطٍ ودقيقٍ (كما تكون الأجوبة الجيدة عادةً): لقد حدث في كلِّ مكانٍ. لم ينفجر العالم ليتحوّلَ إلى أيِّ شيء، وما دام «الانفجار العظيم» يُعطي انطباعاف بحدوث انفجارٍ explosion، فإنّهُ تسمِيَةٌ جَانَبها التوفيقُ. لقد ملأ الانفجار العظيم الفضاء كلَّه: لقد حدث في كلِّ مكانٍ(9). ثم إن العالَم لم يكن، بالضرورة، نقطةً. ولو كان مفروضاً على العالم أن يتوسَّع إلى الأبد، لكان ثمةَ دائماً قدرٌ من المادة خارجَ أيِّ منطقةٍ معطاةٍ، أكبر ممّا هو موجودٌ داخلَ هذه المنطقة، حتى في لحظة خَلْقِ الكون. وهذا يعني أنه لو كان الكونُ «مفتوحاً» ومقدَّراً له أن يتوسّع إلى الأبد، لكان دائماً منتهياً. لذا حتى لو كان الكون المرئيُّ، وهو الكون الذي يمكننا التفاعل فيه حاليًّا ـ والذي يمتد نحو 15 بليون سنة ضوئية من المكان الذي نحن فيه إلى جميع الاتجاهات ـ مُدْمجاً في وقت من الأوقات في بقعةٍ لامتناهيةٍ في الصِّغَر، فلا بدّ، مع ذلك، من وجود منطقةٍ لامتناهِيةٍ في الكبر خارجَ تلك البقعة. وفي تلك الحالة فقط، التي يكون

(8) غالباً ما يَرِدُ التاريخ بأنه الساعة التاسعة صباحاً في 26 أكتوبر. لمزيد من المعلومات، راجع: http://www.merlyn.demon.co.uk/critdate htm.

(9) ربما تنقل الكلمة «plosions» صورةً أفضل مما تنقله كلمة «explosion».

فيها الكون «مغلقاً»، بمعنَى أنه سيعاني انسحاقاً عظمياً Big Crunch بعد وقت طويلٍ في المستقبل ـ وهي فكرة يزداد احتمالُها ضعفاً، ذلك أنّ الأدلّةَ التجريبيّةَ المتعلقة بمعدّل توسّع الكون آخذةٌ في التزايد ـ عندئذٍ يمكن التفكير في العالَم كله بأنه كان في البداية محزوماً في نقطةٍ.

نحن بحاجةٍ، أيضاً، إلى أن نفهم كيف جرى التعبير عن توسّع الكون. وسأشير فيما يلي، لا إلى حجم الكون، الذي ربما كان غيرَ منتهٍ في جميع الأوقات، ولا إلى حجم الكون المرئيِّ، الذي قطره قرابة 15 بليون سنة ضوئية، لكنّهُ كان أصغَر في وقتٍ سابقٍ، لكنني سأتطرّق إلى مقياسه scale، وأعني «بمقياسه» العاملَ الذي يتعلّق بالمسافة بين نقطتين، تبعد إحداهما حاليًّا عن الأخرى متراً واحداً. وهكذا فإن كان المقياس 100، فالمسافة التي تفصل تلك النقطتين 100 متر؛ وعندما كان المقياس واحداً في البليون (10^{-9}) فقد كانت النقطتان مفصولتيْن بمسافةٍ قدرها واحدٌ في البليون من المتر (10^{-9} متر). ويمكن تكييف معادلات آينشتاين لحساب اعتماد الوقت على عامل المقياس هذا لنماذجَ مختلفةٍ من الكون. وكان أوّل من وجد الحلولَ الواقعيّةَ المعقولةَ لهذه المعادلات الطَّيَّار، وقائدُ المناطيدِ، والمتخصِّصُ بالأرصاد الجوّيّة، والرياضيُّ الرّوسيُّ ألكساندر ألكساندروڤيتش فريدمان (1925-1888) A. A. Friedmann، الذي قدّمها عام 1922 مباشرةً قبل إصابته بالحمّى التيفيَّة (التيفوئيد). وتُعْرَفُ هذه المعادلات بمعادلات فريدمان (الشكل 8-4). وقد وجدَ نفسَ الحلول رجل الدين الإكليركي البلجيكي جورج لُومِيتر (1966-1894) A. G. Lemaître عام 1925؛ وقد كان أوَّلَ من عاد بها بالزمن إلى الوراء، وحدّد ما سمّاه «البيضة الكونية» cosmic egg، التي نطلق عليها اليوم اسم الانفجار العظيم.

ويعتقد الكوسمولوجيون حاليًّا أنّ العالَمَ ليس مفتوحاً ولا مغلقاً، لكنه «منبسط» أو "مسطّح" flat. ويشبه العالَمُ المنبسطُ عالَماً مفتوحاً مادام مقياسُهُ سيتوسّع إلى الأبد، لكنه يتباطأ تدريجيًّا ويصبح تباطؤه بلا حدود مع اقتراب مقياسه من اللانهاية. وفي عالَمٍ منسبطٍ، كما هو الحال في عالَمٍ مفتوح، لا وجود

الشكل 8-4. تاريخ عالَم فريدمان. إذا كانت كثافةُ الكون أقلَّ من كثافةٍ معينةٍ، فإنه سيكون «مفتوحاً» وسيتوسّع إلى الأبد. وإذا كان للعالَم كثافةٌ أعلى من كثافةٍ معينةٍ، فسيكون عندئذٍ «مغلقاً» وبعد مرحلة توسّع أوَّليٍّ، سيتقلَّصُ ثانيةً ليصل إلى «الانسحاق العظيم». ولو كان للكون الكثافةُ الحرجةُ بالضبط، لتوسّع إلى الأبد، لكنه سيميل إلى التوقف عن ذلك مع وصول الزمن إلى اللانهاية. وتوحي القياسات الحالية بأن الكونَ غيرُ مغلقٍ. فثمة أرصادٌ جديدةٌ توحي بأن الكون مفتوحٌ، وربما يكون قد دخل حديثاً في مرحلةِ التسارع.

لحدٍّ للانفصال النهائيّ بين نقطتيْن تبعد حالياً إحداهما من الأخرى متراً واحداً. وإحدى نتائج كونِ العالَمِ منبسطاً، مثل كونه مفتوحاً، هي أنّ العالَمَ كان دائماً غيرَ منتهٍ في مداه، ومن ثَمَّ فقد حدث الانفجار العظيم في كل مكان في حجمٍ غيرِ منتهٍ من الفضاء. وحين يقول الناس إن العالَمَ كان في البداية صغيراً جدًّا، فَهُمْ يعنون - ويجب أن يعنوا - أنّ المقياس كان في البداية صغيراً جدًّا، وأنّ النقطتين، اللتين تبعد إحداهما من الأخرى الآن متراً واحداً، كان يفصل بينهما في البداية جزءٌ صغير من المتر. وبوجود قدرٍ هائلٍ من المادةِ مكدَّسٍ في منطقةٍ صغيرةٍ، يمكنكَ القبولُ بأنّ العالَمَ كان كثيفاً جدًّا؛ وفي الحقيقة، فقد كان أكثفَ من الماء بنحو 10^{97} مرّة، وكانت هذه الكثافةُ في كلّ مكانٍ من منطقةٍ غيرِ منتهيةٍ. فقد كان متوفراً دوماً، وسيظل متوفراً دوماً، قدْرٌ هائلٌ من الكون.

إنّ آخرَ نقطةٍ تمهيدية تجعل النّاسَ متردِّدين أحياناً هي فهم أنه على الرغم من أنّ مقياسَ العالَمِ متزايدٌ مع الزمن، فهذا لا يعني أن الأجسام التي يحتويها تَكْبُرُ. فنحن، والقضبان التي نستعملها للقياس، لا تتمدّد مع الزمن، وهذا يصحّ أيضاً على المسافات التي تفصل بين النجوم في المجرّات. ثمة عدة طرائق لفهم

هذا الأمر، الذي يكون مربكاً أحياناً، أسهلها قبولُ الفكرةِ بأن معادلات فريدمان، التي تصفُ التمدُّدَ، تستند إلى نموذج تُعْتَبَرُ فيه المادةُ موزَّعةً بانتظامٍ في الكون كلِّه، واعتبارُ المجرَّاتِ، ببساطة، نقاطاً خياليّةً تشير إلى مواقعَ معيّنةٍ في الفضاء. هذا وإن تمدّدَ المقياسِ لا يشير إلاّ إلى هذا «الكون المنتظم»، ولا يُنْبِىءُ بشيءٍ يتعلّق بسلوك الأنظمة الصغيرة التي تقطُن الفضاءَ. وثمة طريقَةٌ أخرى للوصول إلى نفس النتيجة هي أنْ نلاحظَ أنه إذا كانت نقطتان، كأنْ تكونا نجميْن في إحدى المجرّات، مقيّدتيْن إحداهما بالأخرى بواسطة قوةٍ جاذبةٍ، فلا يمكن أنْ يجري التغلّبُ على هذه القوة بفعل توسّع الكون، ومن ثَمَّ تظلُّ المسافةُ بين النقطتين على حالها مهما طالت مدةُ انتظارنا.

إن أبرع طريقةٍ للتفكير في هذه النقطة المراوغة، والهامة، هي القبول بأن معادلات فريدمان تخبرنا كيف تبتعد نقطتان إحداهما عن الأخرى بافتراض أنهما كانتا، أصلاً، مبتعدتيْن إحداهما عن الأخرى. هذا يشبه، إلى حد ما، معادلات نيوتن في الحركة، التي تنبئنا كيف نحسب المسافة التي تقطعها كرةٌ إذا عرفنا سرعةَ حركتِها الابتدائيةِ. فإذا كانت الكرةُ ساكنةً، فعندئذٍ ستظلُّ في موقِعَها مهما طالَ انتظارُنا. وبالمثل، إذا كانت نقطتان في الفضاء ـ رأسك وقدمك، مثلاً ـ لا تبتعد إحداهما عن الأخرى في البدء، فمهما طال انتظارنا، فإنهما ستبقيان في نفس موقعيهما النسبيَّيْن. ونحن لم نتمدَّد بفعل توسّع الكون أكثر مما يحدث في الفيزياء الكلاسيّة لكرةٍ كانت ساكنةً وانتقلتْ إلى موقعٍ آخَرَ.

●

بإدخالنا لهذه الملاحظات في الاعتبار، فإن الوقت قد بات ملائماً للتوصل إلى تفاهمٍ مع تاريخنا. ففي أيام بلانك، كان يُفترض أن لكلّ القوى التي تُجَمِّعُ المادةَ معاً (القوى الجاذبية، والكهربائية الضعيفة electroweak، والشديدة strong التي سبق وناقشناها في الفصل 6) نفس الشدة، لكنْ مع تَبَرُّدِ الكون إلى دون درجة حرارة بلانك، انفصلت قوة التثاقل من القوتين الأُخْرَيَيْن. وقد واصلتْ هاتان القوتان امتلاكَهما لشدتيْن متطابقتيْن، والانتشار بواسطة بوزوناتِ bosons عديمة

الكتلة. لكنْ لم يحدثْ شيء كثير طوال عصورٍ. وكي نكونَ دقيقين، فقد حافظتْ القوتان القويةُ والكهربائيةُ الضعيفةُ على شدتيْهما المتساويتيْن طوال 10 بلايين تَكَّةٍ tick من تكّات بلانك، إلى حين ما يمكن أن نسميه واحداً في بليون تريليون تريليون من الثانية (10^{-33} ثانية) بعد الانفجار العظيم. إن استعمال تَكَّاتِ ساعاتِنَا المملّةِ شيءٌ مضلِّلٌ، لأن ساعاتِنا صُمِّمَتْ لتلائم حاجاتِ البشرِ، وتكّاتُ الساعاتِ الموجودةِ في الساحاتِ العامّةِ غيرُ ملائمةٍ لمناقشة أحداثٍ عندما كان الكونُ مازال في بواكيره الأولى، وساخناً، وكثيفاً جدًّا. كان التوسّع المبكِّر للكون بطيئاً بدرجةٍ استثنائيّةٍ عند قياسه بالوحدات الطبيعيّة، وهي تكّات بلانك؛ ومن وجهة النظر تلك، من السهل رؤيةُ مقدار التغيّر الذي يمكن حدوثه فيما يمكن أن نقوم نحن المرَدَة الملولين والكسولين أن نسميه طرفةَ عيْنٍ.

وبعد مرور هذا الوقت الهائل في طوله (10 بلايين تكّة بلانك، وما نسميه أنت وأنا واحد في بليون تريليون تريليون من الثانية)، هبطت درجةُ الحرارة بقدرٍ يكفي لفصل القوة الشديدة عن القوة الكهربائية الضعيفة، لذا ففي هذا العالم الذي تزداد برودته من الآن فصاعداً، ستبدو هاتان القوتان غير مرتبطتيْن إحداهما بالأخرى. ونشير، ثانيةً، إلى أنْ الأحداث في الكون وصلت إلى سكونٍ افتراضيٍّ. فالكون توسّع وانخفضت درجة حرارته، لكن علينا الانتظار إلى الأبد تقريباً ـ وكي نكون أدقّ، علينا الانتظار إلى أن تكون ساعة بلانك تكّت 10^{30} مرّة ـ قبل أن يحدث أي شيء قابل للتمييز في هذا العالم الكسول استثنائياً. قد يغريك الظنُّ بأن الانتظارَ هو مجرَّدُ طرفةِ عينٍ أخرى، أيْ واحدٍ في عشرة تريليونات من الثانية (10^{-13} ثانية)، لكنّ ذلك سيمنحك إحساساً زائفاً بالبطء المروِّع للأحداث في الكون المبكِّر، وقد تَعْجَبُ كيف أنه توفّر الوقتُ لحدوثِ أيِّ شيءٍ. وحتّى الآن، فقد تمدّد قياسُ الكون ليبلغَ 10^{15} من طول بلانك. وبالطبع، فعندما يقاس بوحداتٍ أكثر ملاءمةً لحقبٍ لاحقةٍ، نَظُنُّ أنه صغيرٌ جدًّا، إذ إن ما سيصبح انفصالاً قدره مترٌ واحدٌ، كان آنذاك 10^{-20} متر، لكنّ وحداتنا التي نستعملها في حياتنا العملية ليست ملائمةً إطلاقاً، ومضلِّلةٌ جدًّا. لقد بَرَدَ العالَمُ لتصل درجةُ حرارته إلى 10 آلاف تريليون درجة (10^{16} كلڤن)، وهذه البرودة

كافيةٌ لجعل جسيماتٍ معيّنةٍ (ربما كانتْ بوزونات هِيغْزْ Higgs bosons) تلتصق بالبوزونات المعيارية W gauge bosons لها وَZ وبغية منحها كتلة، وهذا يحدّ من مداها، ويميز القوة الضعيفة من القوة الكهرمغناطيسية فيما تبقّى من الزمن. الكون الآن بارد جدًّا إلى درجةٍ جعلتْ القوى تكتسب هويّاتٍ منفصلةٍ تميزها من غيرها إلى الأبد.

لم يَعُدْ ثمةَ شيء يمكن تحديده بوصفه مادةً: فالحرارة مازالت عاليةً بقدر هائل، ثم إن الهياجَ الحراريَّ يحرِّكُ كلّ شيءٍ، بحيث أنْ الأشياء، تحت تأثير القوى، قد تبدأ بالالتحام. إن أول أشكال المادة التي ستتبلور في هذا الجحيم خلال تدنّي درجة حرارته هي النِّكْلِيُونَات أو النُويّات nucleons (البروتونات والنيوترونات)، التي تتكوّن عندما تندمج الكواركات معاً بفعل القوة الشديدة. ولا يمكن لهذا الالتحام أن يحدث إلاّ عندما تهبط درجة الحرارة بقدْرٍ هائل لتصبح 10 تريليونات درجة (10^{13} درجة كلفْن). هل هذه برودة؟ إنها برودة شديدةٌ في مقياس بلانك، لأنها لا تتجاوز 10^{19} درجة بلانك فوق الصفر المطلق. إنها حادّة جدًّا بالطبع، وذلك في مقاييسنا اليوميّة لدرجة الحرارة، لكن هذا المقياس ابتُكِرَ للإعلان عن طقسنا الأرضيّ، وهو ليس أساسيًّا على الإطلاق.

سأخفف الآن من إصراري على استعمال الوحدات الأساسية، وذلك باستعمالي للوحدات التي نطبقها في حياتنا العملية، لأن تطور الكون في هذه المرحلة يَجعل استعمالها أكثر ملاءمةً من وحدات بلانك الطبيعية. بيد أنه يجب ألاّ يغيب عن بالك أن النظرات العَجْلَى إلى الوحدات التقليدية هي، في الحقيقة، أحقابٌ طويلة إلى درجة أنها غير قابلة للقياس تقريباً. ما يبدو مختصراً لنا يمكن أن يكون سلسلةً من الأحداث التي لا تُحصَى في الوحدات الأساسية الطبيعية. فالرصاصة المنطلقة بسرعة الصوت تستغرق دهراً، أو مئة تريليون تريليون (10^{26}) تكّة بلانك، كي تقطع مسافةً طولها قطر نواة ذرية.

بعد ثانيةٍ واحدة من البداية، تقصل ـ تُحرّرُ النيوترينوات neutrinos نفسَهَا من المادّة. ولن تتفاعل مرة أخرى معها، وبدءاً من تلك اللحظة فصاعداً، فهي

سترتحل عبر الكون دون أن يعيقَها شيءٌ، وتجري بسرعةٍ وبحرّيّةٍ عبر الفضاء مخترقةً الكواكبَ، كما لو كانت كُراتٍ بلوريةً شفافةً تماماً إلى حد ما. ولو كان لدينا عيونٌ نرى بها النيوترينوات، تلك الجسيمات التي لا كتلة لها تقريباً، والتي تُدَوِّمُ spins خلال حركتها، فإننا نعتبر الكونَ عند ذلك خالياً تقريباً، وكل ما يحويه شَبَحُ ظِلٍّ هنا وهناك.

وعندما نفكّر أوّل مرةٍ في هذا، فقد نتوقّع أن تكون سماءُ النيوترينوات أسطعَ من سماء الفوتونات. إذ إن النيوترينوات حافظت على سمة الكون، وبخاصةٍ درجة حرارته، وذلك عندما انفصلتْ أولاً، وبرَّدَهَا التوسّع المتواصلُ للكون إلى درجاتِ حرارةٍ أدنى. لكنّ الحقيقةَ هي أنْ خلفيّةَ النيوترينوات أبردُ من الخلفية المكروية الموجة، لأنها أقل بقدر طفيف من درجتينْ فوق الصفر المطلق[10]. السبب في أن سماء النيوترينوات أبرد هو أن الأحداث المختلفة، وتحديداً تصادم الإلكترونات مع جسيماتها المضادة antiparticles، وهي البوزيوترونات positrons، زاد من عدد الفوتونات وزاد السطوع، ومن ثَمَّ درجة حرارة سماء الأمواج المكروية.

بعد ثلاث دقائق من بداية الكون، انخفضت درجة الحرارة إلى بليون درجة. وهذه برودة شديدة (10^{23} درجة بلانك فقط)، بحيث أنه، حتى النُويّات في هذه الأحوال ذات البرودة القطبية يمكن أن تلتحم معاً، مكوِّنةً الدوتيريوم (الهيدروجين الثقيل، نواة مكوّنة من نيوترونٍ ملتحمٍ ببروتون) والهليوم (بروتونان ونيوترونان ملتصقان معاً). وتبيّن الحسابات أنه مع استمرار درجات الحرارة بالهبوط، فإن هذا العصر الكونيّ سيُنْتِجُ قرابة 23 بالمئة من الهليوم، و77 بالمئة من الهيدروجين (بروتونات غير متحدة)، وقدراً جدَّ طفيفٍ من عناصر أثقل (ليتيوم lithium وبيريليوم beryllium، مثلاً، مع ثلاثة بروتونات وأربعة بروتونات، على التوالي، وقليل من النيوترونات التي تساعد على إبقاء البروتونات قريبة بعضها

(10) من المتوقّع أن تكون حرارة خلفية النيوترينوات مختلفةً عن حرارة خلفية الفوتونات بعاملٍ قدره $(4/11)^{1/2}$، وهذا يعني أن حرارة خلفية النيوترينوات هي 1.95 درجة كلفن، في حين أن درجة حرارة خلفية الفوتونات هي 2.73 درجة كلفن.

من بعض). وتتوقف وفرة الهليوم كثيراً على عدد أنماط النيوترينو neutrino، وهذه الوفرة تتعارض مع أي عدد أكبر من أربعة. وكما رأينا في الفصل 6، ثمة ثلاثة أنواع متميزة معروفة من النيوتروينوات. وقد يكون أهم من هذا هو رؤيتنا كيف أن الأشياء الكبيرة جدًّا ـ في هذه الحالة، المقادير الوافرة من الهليوم الموجودة في الكون ـ هي نتيجة لأفكارٍ تكوّنت من دراسة الأشياء الصغيرة جدًّا. إن هذا الانسجام المتبادل في المعرفة الناتجة من الكبير جدًّا والصغير جدًّا هو الذي يبعث الثقة بما وصل إليه العلم.

وفي الآونةِ الأخيرة، لم يحدث شيءٌ جوهريٌّ طوال عصور. وحتى بالوحدات المستعملة الآن، فإن تركيب العالَم سيظل على حاله طوال مئات آلاف السنين. سيواصل الكون تَمَدُّدَهُ وتَبَرُّدَه طوال ذلك الوقت، لكنه سيبقى بلازما، وهي حشدٌ من النَّوَى التي تسبح في بحرٍ من الإلكترونات. هذا وإن الكون في حدّ ذاته حار جدًّا لكنه معتم، ويشبه، إلى حد ما، الشمسَ التي نراها اليوم، لأن الضوء يمكن ألاّ يسيرَ سوى مسافاتٍ قصيرةٍ عبر مثل هذا الوسط. وللسبب نفسه، فإن الشمس معتمةٌ بالنسبة إلينا، وليست كرةً شفافة[11]. ويقوم الفوتون برحلة متعبةٍ وتستغرق 10 ملايين سنة انطلاقاً من مركز الشمس إلى أن ينال الحرّية على سطحها. وفي كلّ جزءٍ من الثانية يجري امتصاصُهُ وإعادةُ بثّه، مسافراً أوّلاً في طريقٍ ثُمَّ في آخر. وفي ذلك الوقت فقط، الذي ينفصل فيه الضوء عن هذا المستنقع من البلازما ليدخل إلى الفضاء الخالي، فإنه يسير بحيويةٍ بسرعة الضوء. وإذا مات مركزُ الشمسِ اليومَ، فإن ضوءها لن يتداعى طوال 10 ملايين سنة أخرى. وقد سادتْ ظروفٌ مماثلةٌ في العالم المبكِّر، عندما كان الضوء مندفعاً ببطءٍ عبر بلازما ساطعة لا يمكن اختراقُها تقريباً.

وفجأةً، وخلال مئاتِ آلافِ السنين من انتشاره، صارت السّماواتُ واضحةً، وكأنّ هذا حدث في يوم صيفيٍّ ملبّدٍ بالغيوم: فقد أصبح الكون شفّافاً، وصار الضوء حرًّا في الانتشار. ولا يوجد الكثير لتراهُ عندما تكون السماء صافيةً، وفي

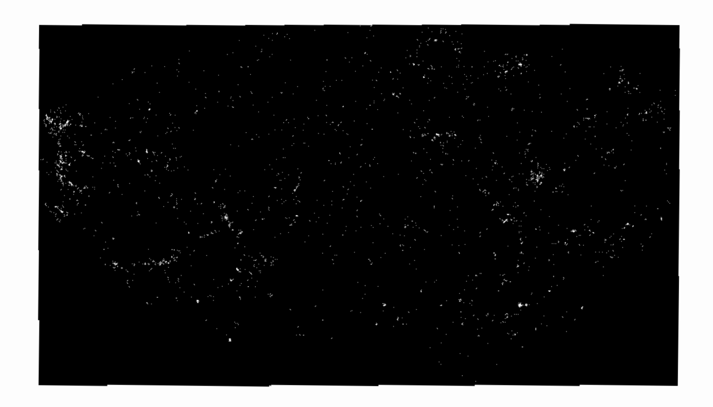
(11) المعادن معتمة لنفس السبب، وهي أيضاً مؤلفة من نَوًى محاطةٍ ببحرٍ من الإلكترونات والاختلاف من العالَمِ في بواكيره هو أن النَّوَى تُكَوِّنُ صفيفاً منظَّماً.

الحقيقة لا يوجد شيءٌ كي تراه، لأنّ النجوم لم تكن قد تكوّنتْ بعد، لكنها لحظةٌ حاسمةٌ في تاريخنا. وفي هذا الصفاءِ السماويِّ، تهبط البرودة القطبية لتبلغَ مجرد 10 آلاف درجة (10^4 كلڤن)، وفي هذه الظروف القارسة البرودة، تصبح الإلكترونات أخيراً قادرةً على الالتحام بالنَّوى. وتتكثف البلازما لتغدو ذراتٍ متعادلةً. والإلكترونات، التي كانت في وقت من الأوقات طليقةً ثم أصبحت مقيّدةً، لا تعودُ قادرةً على بعثرة الإشعاع بفعالية، ويمكن للضوء اجتياز الخلاءِ بحرّيةٍ.

إن الإشعاع الكهرمغناطيسي - الضوء - الذي تحرّر من عبوديته للمادة، هو الآن متوهج الحرارة، إذ ترتفع حرارته إلى 10 آلاف درجة، وهذا لا يختلف عن حرارة سطح الشمس في هذه الأيام، وكلٌّ ما حولنا هو هذا السطوع اللافح. كلٌّ شيءٍ هو كرةٌ ضوئية؛ وسيكون أولبرس، مراسلُ كبلر، سعيداً، لأن هذا هو أصل الليل غير المظلم. ومع استمرار الكون بالامتداد، يصلُ هذا الضوء إلى خلفية الأمواج المكروية microwave background التي تحيط بنا اليوم. وكما سبق ورأينا. فمازالت سماؤنا الحاليّة فرناً ناريًّا متوهجاً، لكن درجة حرارتها هبطت إلى 2.7 درجة فوق الصفر المطلق. ويبلغ إشعاع الخلفية الكوني cosmic background radiation ذروته في منطقة الأمواج المكروية: إنه غيرُ مرئيٍّ لنا ما لم نزوّد أعيننا بمقاريب راديويّةٍ وننصت إلى الهسهسة الناعمة للموجات عندما تقتحم مكاشيفنا detectors.

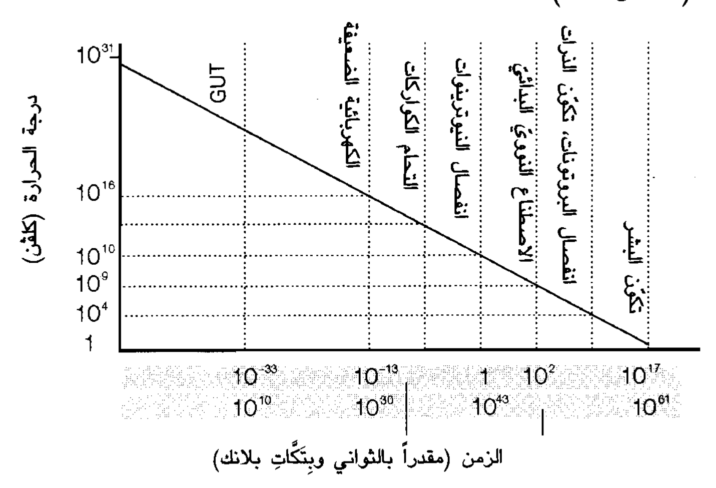
وأخيراً، يوجد في الكون ذراتٌ. إنها ليست متوفرة بغزارة، ثم إن تنوعَّها ضئيلٌ. وإذا قمنا في هذه الأيام بنشر المادة في الكون كله، فلن نجد سوى ذرة هيدروجينٍ واحدةٍ فقط تقريباً في أي متر مكعب. العناصر الوحيدة التي ستبرز في العصر الذي أعقب مباشرةً الانفجار العظيم هي الهيدروجين (كثير منه)، والهليوم (كثير منه، لكنه أقل من الهيدروجين)، وقدر طفيف نسبيًّا من الليتيوم والبيريليوم. العالَمُ، الذي عمره ثلاث دقائق، هو مكانٌ بدائيٌّ ومنعزلٌ بدرجةٍ يصعب تصديقها.

لذا فإنه سيبقى بلايين السنين. بيد أنه كان من المحتمل أن يتوفر للكون تنوُّعٌ استثنائيٌّ، وقد بدأ هذا الاحتمال بالتحقق ببطء. ولأسبابٍ لابدّ لنا من إيرادها، لم يكن الكونُ البدائيُّ سَلِسَاً تماماً. ففي بعض بقاعه، كان الغاز البدائيّ المكوّن من ذراتِ الهيدروجين، وذراتِ الهليوم، و«المادةِ المعتمةِ» dark matter المبهمةِ في الكون، التي سنأتي على ذكرها في وقتٍ لاحق، أكثفَ قليلاً ممّا كان في أي مكان آخر، وكان ثمة تموجاتٌ طفيفةٌ من توزّعه. ومع تقدّم الكون في السِّنِّ، بدأ الغاز في المناطق التي هي أكثر كثافة بالتكثّف بتأثير الجاذبية. ومع تَكَوُّنِ هذهِ المناطقِ الكرويّة الموضعيَّةِ، وبعدما أصبح الغاز منضغطاً، صارت تلك المناطقُ حارّةً. وفي الوقت المناسب، ارتفعت حرارتها إلى درجةٍ أدّت إلى تصادمِ نَوَى ذرّاتِ الهيدروجينِ بقوةٍ شديدةٍ جعلتها تندمجُ معاً وتحرِّرُ طاقةً. ومع بدء الاندماج النووي nuclear fusion، بدأ النجم باللمعان، ودبّت الحياةُ في حشودٍ نجميّةٍ نسميها مجرّاتٍ. إن توزّع المجرّات بعيدٌ عن أن يكون عشوائيًّا، لأنها وُلِدَتْ في المناطق الكثيفة بالتموّجات. فثمة حشود نجمية وبقاع خاوية كبيرة تصل مقاييسها إلى مئات ملايين السنين الضوئية (الشكل 8-5). هذا النموذج الضخم



الشكل 8-5. تَوَزُّعُ المجرّاتِ كما تُرى من الأرض. كلُّ نقطةٍ تمثّل موقعَ إحدى المجرّات. السِّمة التي يتعيّن ملاحظتُها هي أن توزّعَها غيرُ منتظمٍ؛ ثمة أليافٌ طويلةٌ من المجرّات، وبقاعٌ ضخمةٌ عددُ المجرّات فيها أقلُّ من المتوسّط، إنّ عدم الانتظامات هذه هي البقايا المضخَّمةُ الهائلةُ لتقلُّباتِ الكثافة في الكوْن البدائيّ.

هو تكبيرٌ للتموّجات التي رافقت استهلالَ الكونِ، حين كانت الكثافاتُ متغيّرةً بمقياسٍ يعادل بضعةَ أطول بلانك، لكنها تمدّدت وصولاً إلى ضخامتها الحالية. وقد استغرق الكون لبلوغ هذه المرحلةِ 15 بليون (مليار) سنة، لكن تلك المدة القصيرة هي تمديدٌ هائلٌ للزمن بميقاتية بلانك، وترقى إلى ما لا يقلّ عن نحو 10^{61} تكّة (الشكل 8-6).



الشكل 8-6. المقياس الزمنيّ للأحداث خلال حياة الكون. فدرجة الحرارة خلال عصر التضخّم ما زالت موضوعاً للدراسة. هذا وإن التبعَيَّة الخطِّيَةَ للزمن، التي يقترحها الخطّ البياني، يجب ألا تؤوّل حرفياً. فبعد عصر GUT تنفصل القوة الشديدة عن القوة الكهربائية الضعيفة. وبعد عصر القوة الأخيرة، تنفصل القوتان الضعيفة والكهرمغناطيسية. ودرجةُ الحرارةِ المُسْتَشْهَدُ بها هي درجة حرارة الحقل الكهرمغناطيسي؛ ويتكوّن البشر عندما تكون درجة حرارة البيئة المحلّيّة قريبة من 300 درجة كلفن، برغم كون الحقل الكهرمغناطيسي أبرد كثيراً.

إن النجومَ القديمةَ مكوّنةٌ من الهيدروجين، لكنْ لمّا كانت تستهلك الهيدروجين في عملية الاندماج النوويّ، فإنها تكوِّنُ عناصرَ جديدةً. إن الاصطناعَ النوويَّ nucleosynthesis، قد بدأ، وبدأ الكون ليصبح أكثر تنوّعاً. إن تكوّن العناصر في المراحل المبكرة جدًّا من الحياة، قبل أن يتكوّن، أي نجم، يُسمَّى الاصطناع النووي البدائي primordial nucleosynthesis. وهو لا يسير بعيداً في هذه العملية، وهذا يعود، في المقام الأوّل، إلى أنّ النَّوَى مكوَّنةٌ نتيجةَ إضافةٍ متعاقبةٍ للنُوَيّات والبروتونات، وهذا يؤدي إلى حصول الدوتيريوم (نيوترون واحد

مثبت بقوة ببروتونٍ)، والهليوم (بروتونان ونيوترونان بترتيبٍ مستقرٍّ بدرجةٍ معقولة)، وهكذا. بيد أنه لا وجود لنوى مستقرةٍ في خمسةٍ أو ثمانية نُوَيّات، لذا ثمة عنق زجاجةٍ في هذه المرحلة، ومن الصعب على نَوى أثقل النموُّ نتيجةً للتصادمات. وأكثر عنصرٍ يتكوّن بغزارةٍ في تلك المرحلة، هو الهليوم، الذي كان، وما يزال، يمثّل نسبة 23 بالمئة من الكوْن، وكلّ الباقي هو تقريباً هيدروجينٌ. وهذه الوفرة من الهليوم يمكن التنبؤ بها من نظرية الانفجار العظيم، وإن التجارب تُعَدُّ دعماً لهذه النظرية.

ويتعيّن على جميع العناصر تقريباً في الكون أن تنتظر تكوّن النجوم قبل أن ترى ضوء النهار. هذا ليس الموقعَ المناسبَ للتطرّق إلى فرع الفيزياء النووية، لكنْ ما يجب قولُهُ هو أنّ حقيقةَ سطوعِ النجومِ، ومن ضمنها الشمسُ، دليلٌ على أنّ العناصر ما زالت تتكوّن (أو، على الأصح، أنّها كانت تتكوّن قبل ثماني دقائق تقريباً). كان الفلكيّ آرثر ستانلي إدينغتون (1882-1944) A. S. Eddington أوّل من اقترح أن وقودَ النجوم هو الطاقة التي تتحرّر نتيجةَ تصادم نَوَى الهيدروجين، واندماجها معاً في الهليوم.

النجوم أجسام بالغة الخطورة، وهذا يُتَوَقَّعُ من هذه الكراتِ الضخمةِ المكوّنةِ من مادةٍ شديدةِ الحرارةِ، والمعلّقةِ في السماء، والخاضعةِ لاندماجٍ نوويٍّ غيرِ مقيَّدٍ. إنها لا تحترق بسلاسةٍ مثل النّار المنبعثةِ من موقدٍ ثم تخمد ببطء. للنجوم تاريخ عنيف، إذ تجري فيها تفاعلاتٌ نوويّةٌ في أغلفة تقع في أعماقها، وهذه الأغلفة تنمو وتتقلّص وتنهارُ وتولِّدُ نبضاتٍ من الطاقة بوسعها استئصالُ الطبقاتِ الخارجيّةِ من النجم ثم قذفها في الفضاء.

تبدأ قصةُ الحياةِ الصّاخبةِ لنجمٍ بغيمةٍ من الغاز. وبقطْعِ النَّظَرِ عمّا إذا كانت تلك الغيمةُ ستسحبُ أجزاءَها لتجتمع معاً بتأثير الجاذبية، فهذا أمرٌ يتوقف على مجموعةٍ من العوامل، من ضمنها كثافتها، ودرجة حرارتها، وكتلتها. إن الحدَّ الأدنى لكتلةِ غيمةٍ؛ لها درجةُ حرارةٍ وكثافةٌ معطيتان، قادرةٍ على تكوين نجمٍ، يُسمّى كتلة جينز Jeans mass، علماً بأن الفيزيائيّ الفلكيّ جيمس جينز .J

(1946-1877) Jeans دَرَسَ وَبَنَى نظرياتٍ تتعلّق بتكوّن النجوم. وفي الحالة النموذجية، تكون الغيومُ المتخلخلةُ ذاتُ الكثافةِ المنخفضةِ، مستقرّةً أمام الانهيارِ التجاذبي، ولا تكوّن نجوماً، بَيْدَ أنّ الغيمةَ الكثيفةَ لا بد أن تنهار، وفي حالِ غيمةٍ نموذجيّةٍ مكوَّنةٍ من الهيدروجين والهليوم، تَكُونُ كتلةُ جينز مكافئةً لقرابةِ سبع عشرة شمساً. بيد أنه عندما تنهار الغيمةُ على نفسها، تزداد كثافتها، وتتناقص كتلة جينز المتعلقة بها، وبدلاً من تكوين نجمٍ ضخمٍ وحيد، فإن مناطقَ أصغرَ من الغيمةِ يمكن أن تعانِي ذاتُها انهياراً تثاقليًّا، لذا تتشظّى الغيمةُ وتكوِّن حشوداً من النجوم الصغيرة. هذا وإن النجوم المحتملة، التي كتلها قريبةٌ من عُشْرِ كتلة شمسنا، لا تَسْخُنُ بقدرٍ يكفي لاستهلالِ تفاعلاتٍ نوويّةٍ، وتُولَدُ ميِّتَةً: إنها لا تلمع مطلقاً. النجوم المحتملة التي هي أكبرُ كتلةً بنحو تسعين مرّة من الشمس، ليست مستقرةً: إنها تبدأ بالاهتزاز ثم تتشظّى، وهكذا فلجميعِ النجوم كتلٌ تقع بين هذين الحدَّيْن.

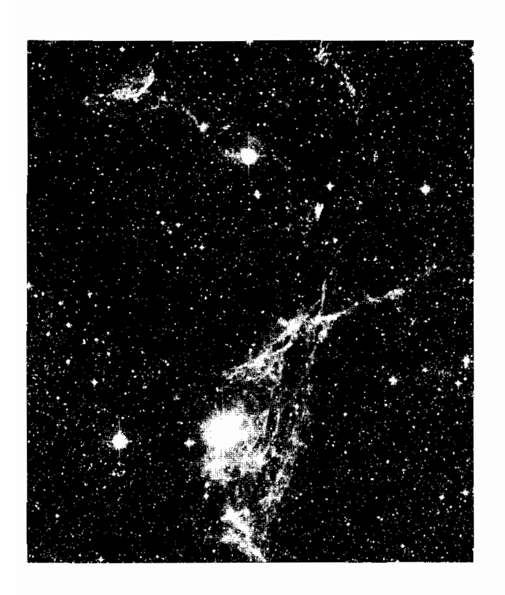
إن الغاز الذي قُدِّر له أن يكوِّن نجماً ـ الغاز المكوَّنُ في أغلبه من هيدروجين وهليوم ـ هو في وضعٍ يمكنه فيه أن يسقط بحرِّيَّةٍ نحو مركزٍ مُشْتَرَكٍ، وخلال سقوط الذرّات، يتصادم بعضها ببعض، وتُسبِّبُ تصادماتُها هذه ارتفاعَ درجةِ الحرارةِ. وإذ ذاك تحين مرحلةٌ تكون درجةُ حرارةِ غيمةٍ منهارةٍ عاليةً جدًّا لتجعل النّوى تتصادم بشيء من العنف بحيث تندمج معاً وتكوّن الهليوم، الذي تتصادم نواه بعضها ببعضٍ لتكوّن عناصر أثقل. وفيما يتعلق بالنجوم، التي هي أكبرُ كتلةً من الشمس بنحو 20 بالمئة، فمن الممكن للحرارة أن ترتفعَ حتى إلى أعلى من ذلك. وتقوم جسيماتٌ درجةُ حرارتِها زهاءَ 20 مليون درجةٍ بالتحرك بسرعةٍ عاليةٍ تجعل البروتونات تنسحق بالتوالي، متحولةً إلى نَوًى ذاتِ شحناتٍ عاليةٍ، مثل الكربون، والأكسجين، وتطلِقُ طاقةً عند أسرها.

وللنجوم التي هي أكبر من قرابة ثماني شموسٍ مستقبلٌ عنيفٌ. فمن الممكن لدرجة الحرارة في هذه العمالقة أن ترتفع جدًّا مقتربةً من زهاء 3 بلايين درجة، وهذا يحدث في «احتراق السليكون»، حيث يمكن لنوى الهليوم أن تندمج بنوى قريبة من السليكون، وتبني تدريجياً عناصرَ أثقل، مجتازةً الجدولَ الدوريّ،

ومكوِّنةً في النهايةِ الحديد والنيكل. ولهذين العنصرين أكثر النّوى استقراراً بين جميع النّوى، ولا يحدث أن يقومَ مزيدٌ من الاندماج النووي بإطلاق طاقة. وفي هذه المرحلة، يتخذ النجمُ بنيةً شبيهةً بالبصلة، أثقلُ عناصرِهِ يُكوّن قلباً حديديًّا للنجم، ويُكوِّنُ أخفُّ عناصره طبقاته المتعاقبة المحيطة بالقلب والتي يتراكب بعضها فوق بعض (الشكل 8-7). إن مدّة كلٍّ من هذه الأحداثِ تتوقّف جوهريًّا على كتلة النجم. وفي حال نجمٍ أكبرَ كتلةً من الشمس بعشرين مرة، فإن عهد حرق الهيدروجين يدوم 10 ملايين سنة، وعندئذٍ يجري حرق الهليوم في أعماق القلب ويستمر مليون سنة. وإذ ذاك يَحترق الوقودُ بسرعةٍ عاليةٍ في القلب. ويَكُونُ حَرْقُ الكربون هناك تامًّا بعد بدئه بثلاثمئة سنة، أما الهيدروجين فيزولُ في 200 يوم، وتنتهي مرحلة حرق السليكون التي تؤدي إلى تكوّن الحديد في يومٍ أو اثنين.

الشكل 8-7. البنية الداخلية لنجم نموذجي كتلته قرابة خمس كتل شمسية خلال اقترابه من طور العمالقة الحمر، علماً بأن قلبه مكوّنٌ من الكربون والأكسجين. وبغية مزيدٍ من الإيضاح، فقد زيدتْ أنصافُ أقطارِ القشور الداخليّة بالنسبة إلى السطح (يدل الشريط الأبيض على تغير المقياس).

إن درجة الحرارة في القلب عالية جد الآن، وتساوي نحو 8 بلايين درجة، وهذا يجعل فوتونات الإشعاع عديدةً وتمتلك طاقةً كبيرةً، تمكّنها من تشظيه نَوَى الحديد إلى بروتونات ونيوترونات، وهذا يُبْطِلُ عَمَلَ الاصطناعِ النوويِّ الذي استغرق ملايين السنين. وتزيل هذه الخطوةُ طاقةً من القلب، الذي يَتَبَرَّدُ فجأةً. والآن، ثمة قليلٌ من الاحتمالاتِ للحفاظ على بنية القلب، ومن ثَمّ فسينهار. وإن الأجزاءَ الخارجيّةَ من القلب حرّة في سقوطها، ويمكن أن تصلَ سرعةُ انهيارها إلى قرابة 70 ألف كيلومتر في الثانية. وفي غضون ثانيةٍ واحدةٍ، ينهار حيِّزٌ



الشكل 8-8. بقايا المستعر الفائق supenova من النمط II (بقايا ڤيلا Vela). حدث هذا المستعر الفائق قبل 11 ألف سنة تقريباً، ويمكنُنا رؤيةُ الطريقةِ التي تنتشر بها المادة - العناصر التي تكوّنت داخل النجم - عبر الكون. وڤيلا هي كوكبةٌ ساطعةٌ من جنوبَ درب التبانة؛ وكانت في وقت من الأوقات تُعْتَبَرُ جزءاً من كوكبة Argo Navis، أو سفينة جيسون Jason. من الصعب جداً التمييز بين الأنماط المختلفة للمستعرات الفائقة.

بحجم الأرض ليصبحَ بحجم لندن. وهذا الانهيارُ السّريعُ بدرجةٍ مذهلةٍ أسرعُ من أن تحذوَ حَذْوَهُ المناطقُ الخارجيّةُ من النجوم، لذا، وباختصارٍ، فإن النجم هو غلاف مجوّفَ مناطقه الخارجية معلَّقةٌ على ارتفاع عالٍ فوق القلب الضئيل المنهار.

إن القلبَ الداخليَّ المنهارَ يتقلّص، ثم يرتدُّ نحو الخارج ويرسِلُ موجةَ صدم من النيوترينوات عبر القسم الخارجي من القلب الذي يتبعه. وتسخِّنُ هذه الصدمةُ القسمَ الخارجيَّ من القلب، وتفقد طاقةً عن طريق إحداثِ مزيدٍ من التحطيم للنَّوَى الثقيلة التي تجتازها. وإذا كان القلب الخارجيُّ غيرُ عالي الكثافةِ، فإن الصّدمَةَ خلال 20 مليثانية من بدايتها تفلت لتصلَ إلى الأجزاء الخارجية من النجم المعلّق بقوسٍ ضخمٍ فوق القلب، وتدفعَ المادةَ النجميَّةَ أمامها مثل إعصارٍ هائلٍ كرويٍّ من نوع تسونامي. وحين تصل إلى السطح، يلمع النجم بسطوع brilliance يعادل سطوع مليونِ شمسٍ، وهذا يفوق سطوع مجرّته باعتبارها مستعراً فائقاً من النمط II (الشكل 8-8)[12]، وعندئذٍ تنطلق المادة النجمية إلى الفضاء.

إنّ موتَ نجمٍ يمنح حياةً للكون، فانفجار النجم يترك القلب المضغوط

(12) سنقابل المستعراتِ الفائقةَ من النمط I في وقت لاحق.

على شكل نجمٍ نيوترونيٍّ neutron star، وهو جسمٌ صغيرٌ، عالي الكثافة، وأملس، ومكوّنٌ من نيوترونات، لكنْ إذا كانت الكتلةُ البدائيّةُ للنجم أكبرَ من نحو 25 شمساً، فيتكوَّن ثقب أسود black hole، وهو منطقة تَتَّسِمُ بسَحْبٍ جاذبي هائلٍ، لا يستطيع حتى الضوءُ الإفلاتَ منها. غير أنّ الأهمّ من ذلك بكثير، على المدى القصير في الأقل، هو الشظايا، لأن العناصر، التي طهيتْ بهذه الطريقة في النجم من الهيدروجين البدائي والهليوم، تتبعثر عبر المجرة. وقد تصبح هذه العناصر مدمجةً في جيلٍ جديد من النجوم. ومع ذلك، فإن بعضها يتحوّل إلى رماد، والرماد يتجمّع ليكوّنَ الصخورَ، والصخور تتجمع لتكوّن جلاميدَ صخريةً، وهذه الجلاميدُ تتحول إلى كواكب. وإذا تكوّنت الكواكبُ حول نجمٍ مضياف، كما تكوّنت الأرضُ حول الشمس، فإنها ستكُونُ الآن غنيّةً بمكوِّناتِ الحياة، الحياة الموجودة في مكانٍ واحد على الأقل، ومن المؤكد تقريباً وجودُ عشراتِ الآلاف منها، وهذه الكواكبُ قادرة على اكتشاف تاريخها الكونيِّ العظيمِ. نحن مخلوقاتُ ضوءِ النجوم[13]: فمن العنف الكونيّ برز ببطء العِلْمُ والفنُّ والسعادةُ.

●

لنعدْ لحظةً إلى بداية الكوْن. لقد بلغ تفسير الانفجار العظيم لتاريخنا نجاحاً مشهوداً. وإن التنبؤاتِ المستندةَ إليه متوافقة كميًّا بدرجة عالية مع الرصد، حيث يكون إجراءُ الرّصد ممكناً، وثمة شكٌّ ضئيل عموماً في أنّ هذا التاريخ صحيح. لكنْ ثمة كثيرٌ من الصعوبات التي تواجه نظرية الانفجار العظيم.

أولاً، لقد رأينا أن «توسّع الكون» يعني في الواقع أن نقطتين تتحرك إحداهما بالنسبة إلى الأخرى، ستبتعد إحداهما عن الأخرى بمرور الوقت. أي أنّ كلَّ ما تقوله النظريةُ هو أنه إذا كانت نقطتان تتحركان الآن، فإنهما ستتحركان في وقت لاحق. ولا تملك النظرية تفسيراً لكونهما متحركتين في المقام الأول!

(13) يغريني أن أقول إن «اللحم البشريّ هو رمادٌ نجميّ». لكنّ هذا قيل كثيراً من المرّات في أمكنة أخرى، وأظنّ أن أوّل من تفوه بهذه المقوّلةِ هو نيكل كالدر N. Calder.

ثانياً، إن الكون منتظمٌ على وجهٍ استثنائي، بالرغم من أنه لا يوجد لأجزاء مختلفة منه وقتٌ لإجراء اتصالاتٍ فيما بينها، ولفهم هذا الكلام، فكِّرْ في نقطتين تبعد كل منهما عنا 15 بليون سنة ضوئية، وأنهما موجودتان في اتجاهين متقابلين من الكون المرئيّ، حيث نقع نحن في الوسط. لقد كان لدى الضوء وقتٌ ليصلَ إلينا من كل نقطة، لكن لا يوجد للضوء وقتٌ ليرتحل بين تلك النقطتين، لأنهما منفصلتان إحداهما عن الأخرى بمسافةٍ قدرها 30 بليون سنة ضوئية. فإذا أجرينا الحسابَ بتأنٍّ ورويَّةٍ، تبيَّن لنا أنّ من الممكن التفكيرَ في السماء بأنها مقسّمةٌ إلى مئة ألف بقعةٍ صغيرة، كلٌّ منها تنحرف بمقدارِ درجةٍ واحدةٍ جانباً، ولم تجد أبداً ما يكفي من الوقت لتبادل الإشارات فيما بينها بسرعة الضوء. فلماذا، عندئذٍ، تكون السماءُ منتظمةً جدًّا ولها نفس درجة الحرارة تقريباً (2.7 درجة) حيثما وجَّهْنَا نظرنا؟ وهذه تسمى مشكلة الأفق horizon problem، لأن كل جزءٍ من الكون يحتاج إلى أن يكون قادراً على الاتصال، بطريقةٍ ما، بمناطقَ موجودةٍ تقع، بمعنًى من المعاني، فوق أفقها المباشر، وإلاّ لما كان الكون المرئيُّ حاليًّا منتظماً، تماماً مثلما لا يكون لقطعتين من الحديد الحارّ نفس درجة الحرارة ما لم تكونا، في وقت من الأوقات، متصلتين معاً[14].

ثالثاً، ثمة شيء شاذٌّ جدًّا يتعلق بشكل العالَم. وفي الحقيقة، فالشكل شاذٌّ من ناحيتيْن، إحداهما أنه يوجد للكون الكميّةُ الملائمةُ تقريباً من المادّة لجعله يتوسّع إلى الأبد. ويُعبَّر عن هذا المعيار عادةً بالقول إن كثافةَ المادّةِ في العالم هي تقريباً الكثافةُ الحرجة critical density[15]. ثمة أسبابٌ نظريَّةٌ وجيهةٌ جدًّا للاعتقاد بأن الفَرْقَ بين الكثافة المرصودةِ والكثافة الحرجةِ يزداد مع توسّع الكون، وأن هذا الفرق اليوم ـ بعد 15 بليون سنة من بداية العالَم ـ لا بد أن يكون قد كَبُرَ بعاملٍ كبيرٍ. فمثلاً، إذا كان الفرق واحداً في عشرة آلاف تريليون

(14) وبكلمات أكثر تحديداً، فإن أفق نقطة تقع على المسافة التي يُمكن للضوء أن يرتحل إليها في العمر الحالي للكون. إن أفق نقطةٍ لعالَم عمره 10^{8} ثانية يبعد مسافة 3 أمتار.

(15) يُعبَّر عن الكثافة بدلالة الوسيط أوميغاً ، حيث 1 = هي الكثافة الحرجة. وعندما يكون 1، فالعالَم مغلق، وعندما 1، فهو مفتوح. وحين يكون 1 = فالكون منبسط، أي أن معدل تمدده يتباطأ إلى الصفر مع اقترابِ مقياسِهِ من اللانهاية.

(1 في 10^{16}) فقط عندما كان عُمُر العالَم ثانِيَةً واحدةً، فإن الفرق سيكون هائلاً الآن، لا مجرّد عاملٍ بين 10 ومئة. والمتطلَّبُ أن يكون حتى أكثرَ صرامةً كلّما عدنا بالزمن إلى الوراء. وكي تكون الكثافةُ في كلِّ مكانٍ الآن قريبةً من قيمتها الحرجة، فَبَعْدَ تَكَّةٍ واحدةٍ لميقاتيّةٍ بلانك لن يكون الفرق اختلف بأكثر من واحد في 10^{60}! وتوحي هذه الأرقام بقوة أنه كان للكثافة قيمتُها الحرجةُ بالضبط عند ولادة الكون، الذي حافظ على هذه القيمة منذ ذلك الوقت. يُسمَّى هذا المطلب المروِّعُ مشكلةَ الانبساط flatness problem، وهي جزء من المشكلة الأعم المسماة مشكلةَ الموالفةِ الدقيقةِ time-tuning problemm. وما زالت المشكلة الأخيرة تربك الكوسمولوجيين، وهي توحي إلى أولئك الذين لديهم نزعةٌ عاطفيةٌ بقدرٍ أكبر من غيرهم أنه يتعيّن على امرءٍ ما التثبُّتُ أنّ الكثافةَ كانتْ حرجةً تماماً في البداية، وأنّ ثمةَ وسطاءَ كثيرين آخرين لا بد أن يكونوا وفّروا (لنا) قيماً خاصّةً وحميدةً عموماً للمواصفات الأصليّة للكون.

المشكلة المرتبطة بهذا هي أن دهشتنا ستتزايد عندما نجد أننا كنّا على قيد الحياة في ذلك العصر بالضبط الذي صارت فيه الكثافةُ الحرجةُ قريبةً من قيمتها الحرجة. ومن المستبعد جدًّا أنه كان للكثافة دوماً، وما زال لها الآن، قيمتُها الحرجةُ بالضبط[16]. وإذا كان الحال كذلك، فبسبب كون الكثافة المقيسةِ أقلَّ كثيراً من الكثافةِ الحرجةِ، فإنه يترتب على ذلك أننا لم نعرفْ كلَّ المادة في الكون. ثمة دليلٌ آخرَ على تلك النتيجة، وهو المعدل الذي تدور به المجرّات حول نفسها، وهذا يوحي بأنها تحوي كثافةً تعادل على الأقلّ 20 بالمئة من قيمتها الحرجة. أين هذه المادة المعتمة dark matter، وما هي؟ أبسط جوابٍ هو أنها مكوّنة من رُفَاتِ نجومٍ قديمةٍ ميّتةٍ. وإذا كانت هذه هي صيغة المادة المعتمة، فلا بد عندئذٍ من وجود ألفٍ أو أكثرَ من أجرامٍ بحجم كوكب المشتري لكلّ نجم حجمه يُعادلُ حجمَ الشمس. فهلْ من المؤكد أننا رأينا مثل هذه الخلية الهائجة

(16) إذا كان للكثافة قيمتها لحرجة في البدء، فإن 0 = - في البدء، وضرب العدد 0 بأي عاملٍ مهما كان كبيراً، يجعل 1 - مساوياً للصفر في جميع الأزمان اللاحقة، ومن ثم فإن 1 = دوماً، وبوجه خاص، الآن.

حتى الآن؟ وعلى الأقل، يوجد لهذه الأجسام اسم، يَكُونُ غالباً الخطوةَ الأولى باتجاه وجودها: فاسم كلٍّ منها هو MACHO [وهذا الاسم مكوّن من الأحرف الأولى من التسمية massive astrophysical compact halo object، أي الهالةُ الضخمةُ المتراصّةُ فِيزيائياً فلكياً)]. ومن المحتّم أن يكون التفسيرُ البديلُ هو وجودَ WIMP [وهذه التسمية مكوّنة من الحروف الأولى من الجملة weakly interacting massive particle، أي الجسيمُ الضّخمُ الضعيفُ التّفَاعُلِ]. والجسيمات الأخيرة هي جسيماتٌ تتفاعل بضَعفٍ مع المادة التي قد نكونُ قادرين على كشفها عن طريق سحبها التجاذبي أو تفاعلها الضعيف فقط، وفي وقتٍ من الأوقات، كان يُظَنُّ أنّ هذا الجسيمَ هو النيوترينو، شريطة أن يكون له كتلة، لكنّ هذا الظنَّ يُعَدُّ الآن بعيدَ الاحتمالِ، لأنّ النيوترينوات ترتحل بحرّيّة تقريباً ضمن المجرات، وتؤدّي إلى نشوء بُنًى كثيرة بمقاييس أكبر كثيراً. ثمة بديلٌ أكثر غرابة هو واحدٌ من مجموعةٍ تسمى عناصرها جسيمات فائقة sparticles، وهي مازالت غيرَ مكتشَفَةٍ بعد، ومفترضةً، وشريكةً فَوق تَنَاظُرِيّةً super-symmetric لجسيماتٍ معروفة (الفصل 6). وأياً كان الحل، فإن العلماء يعتقدون أنهم لم يعرفوا بعد معظم الأشكال الكثيرة لمادة الكون.

المشكلة الرابعة التي تعتري الانفجار العظيم هي أنه يبدو أن لا عدم وجود لأي «وحيدات قطب مغناطيسية» حولنا في هذه الأيام. نحن جميعاً نعرف القضيب المغناطيسيّ ذا القطبين الشماليّ والجنوبيّ. ووحيد القطب المغناطيسي magnetic monopole هو واحد من هذه الأقطاب بدون القطب الآخر، والمعادل المغناطيسي لشحنةٍ كهربائية. فإذا كانت الكهرباء والمغناطيسية وجهين لقوة واحدة، فلماذا تحدث وحيدات القطب المغناطيسية في أزواجٍ، ولا توجد وحيدة أبداً مثل وحيدات القطب (الشحنات) الكهربائية؟ وفي نموذج الانفجار العظيم، يكون هذا هو توتُّر الحدثِ العنيفِ البدائيِّ الذي ينشأ فيه كثيرٌ من العيون ـ ثُلَمٌ، تمزّقاتٌ، تغضُّناتٌ، قِطَعٌ مصطفَّةٌ بطريقةٍ سيئةٍ ـ التي قُدّمتْ إلى الزّمكان، حيث الثُّلَمُ الشبيهة بالنقاط هي وحيدات قطب مغناطيسية. ووفقاً لنظرية الانفجار العظيم، ثمَّة تنبّؤٌ بحدوث وحيدات قطبٍ بقدْرٍ أكبرَ من المادة العادية؛ لكن لم يُعْثَرْ على واحدةٍ منها قطّ إلى الآن.

المشكلة الخامسة هي مشكلة سبق وذكرناها: إنها البنية ذات المقياس الكبير للكون الممثلة في الشكل 8-5، الذي نرى فيه المجرّاتِ محتشدةً حول مناطَق خاويةٍ مقاييسها تقدَّر بمئات ملايين السنين الضوئية. رأينا هناك أن هذه البنيةَ هي نموذجٌ مكبَّرٌ جدًّا للتكتلات الكثيرة للعالَمِ البدائيِّ، عندما كان مقياسُه أكبَرَ قليلاً من بقعةٍ لا متناهيةٍ في الصِّغر، وكأنها نقطةٌ. لكنْ لماذا كانت النقطة متكتّلةً في المقام الأول؟ ولماذا كان لها هذا التكتلُ الذي أصبح، في الوقت المناسب، ما نجده اليوم؟ هذه المشكلة تقع كلّيًّا خارج حدود نظرية الانفجار العظيم. ولا نملك الادّعاء بأننا نفهم عَالَمَنَا إذا لم تكن لدينا فكرةٌ عن أصل أكبر جسمٍ فيه!

هذه المشكلات الخمس ـ أصل التمدد، مشكلة الأفق، مشكلة الانبساط، مشكلة وحيدات القطب المفقودة، وجود بنًى ذات مقاييس كبيرة ـ خطيرة جدًّا. ومع ذلك، فنظرية الانفجار العظيم ناجحة جدًّا في سياقات أخرى. وفي الحقيقة، فإن التجاربَ تؤيّد فعليًّا أن الكوْنَ مرّ بمرحلةٍ حارّةٍ جدًّا، وأنه بدأ بالتوسّع منذ ذلك الحين. والجواب يجب أن يكون موجوداً في الأحداث التي جَرَتْ في اللحظات الأولى للانفجار العظيم، وهي أحداثٌ سبقتْ تلك التي نَعُدُّها قديمةً جدًّا. إن النظرية المفضّلة حاليًّا هي ضَرْبٌ من التّضخّم (الانتفاخ) inflation.

التضخّم ليس توسعاً عاديًّا. التضخُّم هو توسّع سريعٌ جدًّا. لقد لاَحَظْتَ حتى الآن أنني لا أستعمل كلمة «جدًّا» قليلاً، وأنني أستعمل كلمة «جدًّا» بمعنى أقلّ قدر أقلّ من الأولى. وهنا أعني تمدداً بسرعةٍ أعلى من سرعة الضوء. لا تقلق من شيء يحدث بسرعةٍ أعلى من سرعة الضوء: فلا وجود لصعوبةٍ معينةٍ في مفهوم التوسّع فوق الضوئي superluminal، لأنه مقياسُ فضاءٍ آخذٍ في التوسع؛ ونحن لا ننظر في انتشار إشاراتٍ عبر ذلك الفضاء، وفي السيناريوهات التضخّمية (ثَمَّة نماذجُ كثيرةٌ لها، كلٌّ منها يدور حول محورٍ مركزيٍّ لفكرةٍ ما)، ثمة شيء ـ سنعود إليه ـ يشتغل طوال 10^{-35} ثانية بعد بدء عمله. ثم يبدأ الفعل. لذا ففي كلّ 10^{-35} ثانية بعد ذلك، يكبُرُ حجمُ العالَمِ بأكثر من الضعف[17]، وهو يواصلِ كبَرَهُ بحجمٍ أكبر من ضعف ما كان عليه كل 10^{-35} ثانية لاحقة، إلى أن

(17) أعني بعبارة «أكثر من الضعف» زيادةً في الحجم بعامل قدره ...2.718.

يتوقّف التضخم بعد 10^{-32} ثانية تقريباً، إذ يحين وقت كِبَرِ الحجم مئة ضعف. فَكِّرْ فيما يعنيه هذا بمصطلحاتٍ ذات طابع بَشَريٍّ أكبر. لنفترض أن الحجم الابتدائي هو سنتيمتر واحد. إن كِبَرَ الحجمِ بأكثر من الضعف يوصلنا إلى 7.2 سنتيمتر. وكبر الحجم ضعفين اثنين يأخذنا إلى 7.4 سم، وثلاثة أضعاف يوصِلنا إلى 20 سنتيمتراً وعندما يكون لدينا 10 أضعاف، نصل إلى 220 متراً، وعندما يصبح 20 ضعفاً نحصل على 4852 كيلومتراً، وفي حال 50 ضعفاً نصل إلى 5480 سنة ضوئية (أي نكون قد وصلنا إلى $5\ xx10^{-34}$ ثانية ضوئية تذكّر ذلك). وإن قيامنا بمضاعفتين جديدتين يؤدي إلى احتواء المجرّة. وبمزيد منها نصل إلى المجموعة المحلِّيَّةِ local group. وبعدْ قيامنا بمئة مضاعفة جديدة يكون الجسم الأصلي قد كبرُ بعامل قدره 10^{43}، وفي بعض نماذج التضخم، يكون التمدد أكبر حتّى من ذلك، كأن يكون بعاملِ 10 مضروباً في نفسه تريليون مرّة، أي $10^{1000,000,000,000}$. هذا تكبيرٌ هائلٌ، هائلٌ حقًّا، حَدَثَ خلال 10^{-32} ثانية.

سنبتعد قليلاً عن هذه الملاحظة. أنا أوردتُ، عن قصدٍ، وصفاً مثيراً للتضخّم باستعمال وحداتٍ يتداولها الناس، ومع ذلك، فستدرِكُ الآن أنّ ثمة طريقةً أفضلَ للتفكير، هي استعمالُ وِحْداتٍ أساسيةٍ. ومن وجهة النظر هذه، نفهم التضخُّمَ على حقيقتِهِ. أوّلاً، فيما يتعلق بالزمن 10^{-35} ثانية، فإن مدة الاستهلال طويلةٌ جداً في الواقع، لأنها تعادل مئة مليون من تَكّاتِ بلانك (يوجد، تقريباً، مئة مليون ثانية في ثلاث سنوات، لذا، فبغيةَ جعل الوقت مقبولاً، فكِّرْ فيه على أنه ثلاث سنوات). ثم إنّ أكثر من مضاعفة المدة يَستغرق مئة مليون تكَّة أخرى - «ثلاث سنوات» أخرى - وهذا أمرٌ لا يثير الهياج.

لِنَرَ كيف يَحُلُّ التضخمُ مشكلاتِ نموذجِ الانفجارِ العظيم. إنّ مشكلةَ الأفُقِ محلولةٌ، لأنّ جميع النقاط، التي يبعد بعضُها عن بعضٍ مسافاتٍ كبيرةً جدًّا في هذه الأيام، بحيث لا يمكن الوصول من إحداها إلى الأخرى بسرعة الضوء، كانت في الحقيقةِ قريبةً جدًّا في البداية بعضها من بعض، وكان لديها وقتٌ طويلٌ يسمحُ باتصالِ إحداها بالأخرى. وبعبارةٍ أخرى، كان كلُّ عالَمِنَا الحاليِّ المرئيِّ محزوماً معاً في منطقةٍ صغيرةٍ إلى درجةٍ تجد فيها الإشاراتُ الوقتَ الكافي

للارتحال عبرها ومجانستِها. ومشكلة الانبساط محلولةٌ لأن التضخّم يَبْسُطُ التقوّسَ الابتدائيَّ، تماماً مثلما يصبح السطح المتجعّد لمنطادٍ أملسَ بعد نفخه، ومسألة أحادية القطبية محلولةٌ لأنه حتى لو كانت أحاديات القطب موجودةً في البداية، لكان ما يوجد منها الآن واحداً فقط في منطقتنا من العالَم، وليس من المفاجيء أنها لم تُكْتَشَفْ حتى الآن. وسببُ وجود مادّةٍ هنا هو أنها تتكوَّنُ بعد التضخّم، في حين أنّ أحاديات القطب تكوّنت قبل التضخّم. آخر نقطةٍ يجب توكيدها هي أنه لو كان التضخّمُ حقيقيًّا، لكان الكونُ أكبر كثيراً مما نظنّ، وما نراه ـ وما بوسعنا أن نراه ـ ليس سوى جزءٍ جِدٍّ ضئيلٍ من كل ذلك. الإذلال تَضَخَّمَ أيضاً، وهناكْ مزيدٌ منه في المستقبل.

ما زالتِ المسألةُ المطروحةُ هي: كيف بدأ التضخُّمُ؟ لدينا أيضاً مسألةٌ جديدةٌ: لماذا توقف التضخّمُ بعد 10^{-32} ثانية؟ كان أوّلَ من قدّمَ فكرةَ التضخُّم الفلكيُّ والرياضيُّ الهولنديُّ وِليام دي سيتّر W. de Sitter (1872-1934) وذلك عام 1917. وقد أدرك أنه إذا كان للخلاء طاقةٌ، فلا بد أن يحدث تضخُّمٌ. إن امتلاكَ الخَلاَءِ طاقةً يجب ألاّ يُظَنَّ أنه مسألة مثيرة للمشكلات: فما نعتبره «خلاءً» هو فكرةٌ تحكّميَّةٌ arbitrary؛ على كل حال، ويجب ألاّ يُظَنُّ أن الفضاء الخالي هو لا شيء مطلقاً. سنفترض أن الخلاء مملوء بحقلٍ، يُسمى حقل التضخّم inflation field. وثمة طريقة بدائية جداً لتصوّر حقل التضخم، هي أن نفكر في العالَمِ بأنه موصولٌ بقطبٍ واحد لمدّخرةٍ (بطارية)، عندئذٍ يكون له فولطيّةٌ منتظمةٌ، ولتكن، مثلاً، 12 ڤولطاً. لن تكون تلك الڤولطيّة قابلة للكشف بأي تجربة يمكننا إجراؤها، ويمكننا تسميتها خلاءً زائفاً false vacuum. بوسعنا، بعد ذلك، التصوّر أننا فَصَلْنَا المدّخرةَ وفرّغنا الكونَ. في تلك الحالة يتغير الخلاء ذو 12 ڤولطاً ويتحول إلى خلاء حقيقي true vacuum ڤولطيّتهُ 0. إن كِلاَ نموذجي الخلاء سَيَبْدُوَان شيئاً واحداً لنا، لكنهما مختلفان.

ولمّا كانت هذه الأفكارُ غريبةً إلى حدٍّ ما، فقد يساعدنا رؤيتها في سياقٍ أوسع. أولاً، من الجدير بالملاحظة أن الكيميائيين لم يفكّروا في أن الهواءَ شيءٌ يستحقُّ الدراسةَ إلاّ في وقت لاحق، بعد أن طوَّروا مواضيعَ بحوثهم، إذْ كيف

يُمكن لشيءٍ غير جوهريٍّ ظاهريًّا أنْ يمتلك خاصيّاتٍ كيميائيةً؟ ويمكننا التفكير بنفس هذه الروح عندما يكون موضوعنا هو الخلاء. ويبدو أنّ تاريخَ العِلْمِ يسير على طريقِ توسيعِ مجالاتِ دراستِهِ لأشياءَ أقلَّ أهميةً: فالهواء شيء قديم، وفي هذه الأيام، ثمة خلاءاتٌ متنوعةٌ ومختلفةٌ تقع في مركز اهتمام الفيزيائيين، ومن الممكن أنه عندما يشرعون بتقديم النظريات المتعلقة باللحظة الحقيقيّة لبداية العالَم، فعندئذٍ يتعين عليهم دراسة أشياءَ غيرِ موجودةٍ على الإطلاق. وقد نكتشف أن للأشياء غير الموجودة مطلقاً خاصياتٍ، وأنها يمكن أيضاً أن تأخذ صيغاً مختلفة[18].

إن السؤال الذي يجب علينا معالجتُهُ هو: كيف يَنْجُمُ من امتلاكِ الخلاءِ طاقةً تضخمٌ سريعٌ؟ الآلية هي نوع من التغذية الراجعة الإيجابية positive feedback، أولاً، نحن نلاحظ أنه كلما ازداد توليد الخلاء، ازداد توسّع الكون، لذا فإذا امتلك الخلاء طاقةً، فإن الطاقة الكلية للكون تزداد. بعد ذلك، تبيِّن معادلات فريدمان أنّ معدّل توسّع الكون يتزايد مع الطاقة التي يحويها، لذا فإن معدّل التوسّع يتزايد مع التمدد. وبسبب كون معدّل التوسّع متناسباً نظرياً مع مقياس العالَم، لذا يتزايد المقياس أسِّيًّا exponentially مع الزمن. إن التغيراتِ الأسِّيَّةَ تتعاظم بسرعةٍ عاليةٍ جدًّا، لذا يحدث تضخّمٌ سريعٌ ما دام حقل التضخّم موجوداً (الشكل 8-9).

ومع ذلك، فإن المشكلة التي تواجه نموذج دي سيتر هي أنه لم يكن ثمة طريقةٌ لإيقاف التضخم. لقد استمر التضخم أبداً، وكانت النتيجة أن جميع المادة والإشعاع انحدرا بسرعةٍ إلى الصفر، مخلّفَيْن عالَماً خيالياً، ولمّا كان هذا مناقضاً للتجربة، فقد استُبعِدَ نموذجُه التضخميُّ وذهب تقريباً إلى غياهبْ النسيان. لكن مفهوم التضخم عاد إلى الحياة من جديد في أواخر القرن العشرين، وذلك في

(18) أنا لا أمزح أبداً. فإذا برز الكونُ من العَدَم المطلق، فمن المفترض أن تأتي مرحلةٌ يتعيّن علينا فيها دراسةُ كيف يُمكن لشيءٍ أن يَنْتُجَ من لا شيء إطلاقاً. وفي يوم من الأيام، لابدّ للعلماء من دراسة العَدَمِ المطلقِ.

الشكل 9-8. العالَم التّضّخميّ، بعدَ وقتٍ قصيرٍ من استهلال العالَمِ، بدأ مقياسُهُ بالتزايد بسرعةٍ هائلةٍ، إذْ كان نصف قطره يكبر بأكثر من الضعف. كلَّ 10^{-35} ثانية. ويرى العصرُ التّضخّميُّ تزايداً أُسِّيًا في حجم الكون، لكنّ هذا التزايدَ يصلُ إلى نهايته بعد 10^{-32} ثانية. ومن الآن فصاعداً، يسير التوسّع بهدوءٍ أكثر، ويوافِقُ أحدَ السيناريوهاتِ الممثّلةِ في الشكل 8-4.

جزيرتيْن منعزلتين من النشاط الفكريّ. أحد مراكز النشاط كان في الاتحاد السوڤييتي عام 1979، عندما استعمل أَلِيكْسِي ستاروبنسكي A. Starobinsky أفكاراً من نظرية النسبية العامّة بغية تطوير فكرةٍ سابقةٍ كان قدّمها روسيٌّ آخر، هو إراسْتْ غْلِينَرْ E. Gliner عام 1965. أمّا في الولايات المتحدة، فكان ألان غوث A. Guth يدرس مشكلة توليد وحيدات القطب المغنطيسية غير المرغوب فيه، بوصفها مشكلةً في فيزياء الجسيمات، وقد توصّل إلى فكرةٍ مماثلةٍ عام 1991.

كانت الفكرة المركزية في هذا النموذج المبكّر للتضخم هي اعتباره أنه حدث مثل «انتقال الطوّر» phase transition، وهو تغيّر في الحالة شبيهة بتجميد الماء ليصبح جليداً. وخلال تضخم الكون، يتبرّد، ويمكن أن تصل درجة حرارته إلى الصفر المطلق تقريباً، والتمدد لا يقل ضخامةً عن ذلك، ومع ذلك، تحين لحظةٌ عندما ينهار الخلاء الزائف إلى خلاء حقيقي ويطلقُ قدراً هائلاً من الطاقة. ولتصوير هذا الانتقال، فَكِّرْ في الخلاء الزائف وكأنه ماء سائل، وهو وسطٌ شفاف يبدو وكأنه غير موجود. إن الحالة المتضخمة للكون تشبه ماءً مبرّداً

بدرجةٍ فائقة: عندئذ تكون درجة حرارته أدنى كثيراً من نقطة تجمده، لكنه ظلّ سائلاً. وعندما يتجمد الماء فجأةً، فإنه يُطْلِقُ «حرارتَه الكامنةَ» خلال اتخاذ جزيئات الماء ترتيباً ذا طاقة أخفض، وهو الجليد. وبالمثل، فإن الخلاء الزائف الذي بُرِّدَ بدرجةٍ فائقة ينهار فجأة ليصبح خلاءً حقيقياً، مطلقاً كل طاقة حقل التضخّم، ورافعاً درجة حرارة الكون، ومنهياً التضخم. وبدءاً من هذه النقطة، يبدأ الانفجار العظيم بالعمل، ويتوسّع العالَمُ بطريقةٍ أكثر رَوِيَّةً.

هذا هو جوهر السيناريو «القديم» للتضخم. وكما قد تتوقع من الاسم، ثمة نموذج أكثر جِدَّةً. والمشكلة التي تواجه النموذج القديم هي أن إطلاق الطاقة يعيد تسخين الكون كثيراً، إلى درجةٍ تظهر فيها عدة عيوب ـ وحيدات القطب ـ في نهاية عصر التضخم. وقد برزت مشكلات أخرى تتعلق بالمعدّلِ الذي حدث به التضخم ثم انتهى. وعلى سبيل المثال، فالكون، في مشكلة المبكِّر، يمكن أن ينهار قبل أن يَجِدَ التضخُّمَ وقتاً للشروع في التقدّم. وهناك أحد سيناريوهات التضخم «الجديدة» لحلّ هذه المشكلات.

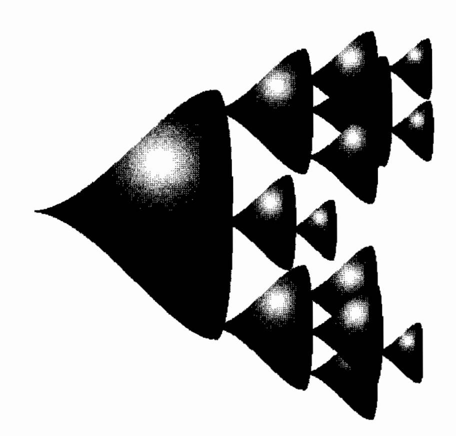
أحد السيناريوهات الواعدة هو التضخم الشواشيّ chaotic inflation، الذي قدّمه أندريه لِينْدْ A. Linde عام 1982، ثم طوّره بالتفصيل، هو وآخرون، منذ ذلك الوقت. هنا لا يُطْلَبُ انتقالُ طورٍ لحقلِ التضخم بحرارةٍ عاليةٍ، وبدلاً من ذلك، فإن عالَماً بارداً أتى إلى الوجود بقيمةٍ تحكّميّةٍ arbitrary لحقل التضخم، وإذا كان الحقل كبيراً بدرجة كافية، حدث التضخم. وفي الوقت المناسب، عاد الحقل ببطءٍ إلى الحالة الموافقة للخلاء الحقيقيّ، وعندها يصل التضخم إلى نهايةٍ لطيفةٍ. وارتفاع درجة الحرارة المرافقة للوصول إلى هذه النهاية، المسمّاة الخروج اللطيف graceful exit، من عصر التضخم أدنى بكثير مما هي في نموذج انتقال الطور. لذا ينتج قدر أقل كثيراً من العيوب ـ وهذا يعني عدم وجود وحيدات قطب ـ لكن الحرارة الناتجة عالية بدرجة تكفي لاستهلال عهد الانفجار العظيم المألوف الذي مانزال نقيم فيه. هذا وإن تقلّبات الكثافة التي تبرز في هذا السيناريو تبدو ملائمةً جد لتفسر توزّعِ المجرّاتِ، وأيضاً التقلّباتِ الطفيفة في إشعاع الخلفية الكوني الذي جرى رصده. وعلى الرغم من أن نظريات التضخّم مازالت تخيّليّة

إلى حدٍّ بعيد، وأنه عندما يُكتَبُ عنها نوعيًّا فقد لا يكون ذلك أفضل من تأليف أساطير بدائيةٍ للخَلْق، فإنها مقيّدة بقوة بالرياضيات، ثم إنها تقدّم تنبؤاتٍ يمكن اختبارها تجريبيًّا في عصرنا هذا. إن أصل الكون هو إحدى ذُرَا (جمع ذروة) التطبيق التخيّليّ للعلم، لكنْ هذا هو العلم الذي يظل قابلاً للاختبار.

أحد التداعيات المسلّيةِ لنظريةِ التضخّمِ الشواشيِّ هو إدراك أنه بعيداً عن إلغاء العيوب النقطيّة، التي أسميناها وحيدات القطب المغنطيسيّة، فإن التضخّم يضخمها فعلاً، وهذه العيوب النقطية تواصل التمدد حتى عندما يكون التضخم قد توقّف في جوارها. ويمكن أن تقوم العيوب النقطيّة مقامَ بذورِ بروزِ عالَمٍ جديدٍ. هذا، بالطبع، هو الإذلال النهائيُّ، وقد لا يكون هذا العالَمُ سوى واحدٍ من عددٍ لا يُحصَى من عوالِمَ أخرى. ولسنا نحن، دون غيرنا، الذين نقطن في كوكب غير مهمٍّ (وإنْ كان رائعاً!)، قربَ نجم غيرِ مهمٍّ (وإنْ كان رائعاً!)، وفي مجرّةٍ غير مهمّةٍ (وإنْ كانت رائعةً!)، وفي عالم مرئيٍّ غير مهمٍّ (وإنْ كان رائعاً)، لكنْ عالَمَنَا قد يكون غيرَ جوهريٍّ بين العوالِمِ الأخرى التي لا تُحصَى، والتي يمكن أن نسمّيها «عالَماً متعدِّداً» multiuniverse، كلُّ عنصرٍ فيه عالَمٌ غيرُ منتهٍ.

ليس من الضروريِّ أن يكون عالمنا نشأ قريباً من بداية الزمن، لأنه قد يكون سليلَ شجرةٍ لها فروع عددها لا يحصى من التريليونات (الشكل 8-10). ومع أننا نقول إن انفجارنا العظيم حدث قبل 15 بليون سنة، فإن البداية الفعلية للكون الأصلي ربما كانت أقدم بكثير، لكنّنا نأمل ألاّ يصح ذلك، لأنّه يصبح بعيداً عن أن يدركه الخيالُ العلميُّ.

ثمة سؤالان آخران كبيران لا بد لنا من الالتفات إليهما. أحدهما هو: ما السبب في أنّ العالَم (وبخاصة عالَمُنَا، الذي يمكن أن نضيفَ إلى ذلك الآن، عالَمُنَا في العالَمِ المتعدّد) يعوزه التوازن؟ والثاني هو: إلاَمَ يعودُ السبب في أن العالَمَ ثلاثي الأبعاد؟



الشكل 8-10. في أحد نماذج التضخم، يمكن للعالَم الموجودِ تكوينُ براعِمَ لعوالمَ جديدةٍ تتضخم فوراً، تماماً مثلما يبدو أن عالَمَنَا فعل ذلك. وهذه النظرة إلى الكون، تُعيدُ اللحظةَ الحقيقيةَ لولادة النظام الكلِّيّ من العوالِمِ إلى زمن قديم جدًّا، لأننا قد نكون نقطن الآن عالَماً غيرَ مهمٍّ تَحَدَّرَ من مئات آلاف العوالِمِ، مع العلم بأنّ العالَمَ الأوَّليَّ تكوَّن قبل تريليوناتٍ وتريليوناتٍ من السنين - وذلك إذا كان الزمنُ في هذه العوالم الأخرى جمعيًّا additive. أحد الأجوبة الممكنة عن السؤال: «أين تقع تلك العوالم الأخرى؟» هو أنها تقع بيننا: فإذا فكّرنا في الزمكان بأنه مكوَّنٌ من نقاطٍ نعتبرها قريبةً إحداها من الأخرى، فمن الممكن التخيُّلُ بأن العوالِمَ الأخرى تَستفيد من نفس النقاط، لكنها تعتبرها مرتبطة بها بطريقة مختلفة. لذا فالنقاط التي يتكوّن منها مليمترٌ مكعّبٌ في هذا الكون قد يمكن توزيعها على الزمكان الكلي لعالَمٍ آخر.

أولاً، لماذا يوجد من المادة أكثر مما هو موجود من المادة المضادة antimatter؟ أحد الاحتمالات هو وجود مجرات من المادة المضادة في مكانٍ ما. وحقيقة أننا لم نَرَ أيَّ مادةٍ مضادة ليس مردَّها إلى الامتناع عن تعرّف مجالاتٍ أخرى من الكوسمولوجيا، بل إلى عدم وجود دليل على وجود مثل هذه المجرات. وفي الحقيقة، لما كان الفضاء بين المجرّيّ مليئاً بذرات الهيدروجين - قد يكون قولنا بأنه مليء يتضمّن بعض المبالغة، لكن هناك الكثير جداً من هذه الذرات - فيجب أن نتوقّع رؤيةَ إشعاعٍ كثيفٍ من إبادة هذه الذرات حين تنجرف مجرّات المادة المضادة إليها. لم يُرْصَدْ مِثْلُ هذا الإشعاعِ، لذا فإنه يبدو كما لو كان يوجدُ حقيقةً مادةٌ أكثر ممّا يوجد من المادة المضادة. وبعبارةٍ أدق، إذا وُجد في البداية قدْرَانِ متساويان من المادة والمادة المضادة، فلا بد أن تكون كلٌّ منهما أفنتِ الأخرى، وَلَمَا تبقَّى إلاّ فوتونات الإشعاع الناشىء عن الإفناء. وفي الحقيقة،

ثمة جسيم واحد مقابلَ كل بليون فوتون، لذا لا بد أن يكون قد حدث رجحانٌ طفيفٌ للجسيمات على الجسيمات المضادة antiparticles في البداية. كيف يمكن لهذا أن يحدث؟

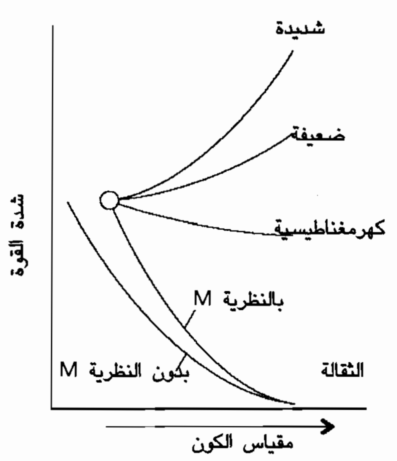
لقد توصل الفيزيائيُّ والمنشقُّ الروسيُّ أندريه سَاخَارُوفْ A. Sakharov (1921-1998) إلى القواعد الإجرائية عام 1965، لكنه كان يفتقر إلى آليةٍ لتطبيقها. وقد حاجّ في أنه يجب توفُّرُ ثلاثةُ شروطٍ. أحدها ضرورة وجود عملياتٍ لا تحفظ عدد الهَدْرُونَاتِ hadrons، بمعنى أن الهدروناتْ (البروتونات، مثلاً) قد تتحوّل إلى لبتونات leptons (بوزيترونات مثلاً)[19]. الشرط الثاني هو أن تناظر زوجية الشحنة charge conjugate parity (cp) يجب انتهاكه (c تدلّ على انقلاب الشحنة charge conjugation، أما p فتدل على الزوجية parity؛ انظر الفصل 6). الشرط الثالث هو أن الأحداث يجب أن تجري ببطء يكفي لتفادي التوازن: فكل خلل في التوازن، إذا حدث في لحظةٍ ما، يجب أن يُتْرَكَ frozen in خلال تطوّر الكون بسرعة إلى مستقبله.

نحن نعرف الآن أنّ النظريات الموحّدة الكبرى grand-unified (GUT's) theories الافتراضية (التي شرحناها في الفصل 6) تُلغي الفرقَ بين الهدرونات واللبتونات، لذا، ففي درجات الحرارة العالية (قبل أن يكون انتهاكُ التناظرِ قد أحدث تمييزاً بين الجسيمات)، يمكن للهدرونات أن تصبح لبتوناتٍ وبالعكس. ويمكننا التفكير في هذا التحوّل بأنه حدث بفعل نوع من القوى يدفعُ الهدرونَ ليصبح لبتوناً. ويتوسّط هذه التحولاتِ - كأيّ قوةٍ - استبدال البوزونات العيارية. وبسبب عدم صوغ نظرية موحدة كبرى راسخة بعد، فإننا لا نعرف الكثير عن خاصياتْ هذه الجسيمات الحاملة للقوى، لذا فهي تسمّى حالياً البوزونات العيارية X gauge bosons. بيد أننا نعرف أن بوزوناً X ينجز الانتقال بين هدرونٍ ولبتونٍ، فسيكون قادراً على الاضمحلال ليصبح بوزيتروناً وكواركاً مضاداً تحتياً

(19) رأينا في الفصل 6 أن الهدرونات هي جسيمات تتفاعل بواسطة القوة الشديدة، أما اللبتونات فلا، وتضمّ الهدرونات الكواركات والجسيمات المكوّنة منها؛ أمّا اللبتونات فتضم الإلكترونات والنيوترينوات.

antidoun quark. وبالمثل، فإن الجسيم المضاد لبوزونٍ X، يمكن أن يضمحل ليصبح إلكتروناً (جسيماً مضاداً لبوزيترون)، وكواركاً تحتيًّا down quark. وإذا كان معدَّلاً هذين الاضمحلالين مختلفين قليلاً، فلا بد من حدوثِ عدمِ توازنٍ ضئيلٍ بين المادةِ والمادة المضادة، حتى لو كان ثمة أعدادٌ متساويةٌ من البوزونات X والجسيمات المضادة لبوزونات X في البداية. وهذا هو المكان الذي يدخل فيه انتهاك CP، لأنه يستطيع أن يقلب قليلاً معدلاتِ تلك العمليات. وقد رأينا أن انتهاك CP مكافىء لانهيار اللاّتغير في عكس الزمن، بمعنى أن ثمة عمليةً تعود إلى الوراء لا يمكن تمييزها عن عملية تسير إلى الأمام زمنيًّا، وأن عدم التوازن هذا في الكون قد جرى في الحقيقة كشفه. ويُعتقد الآن أن رجحان المادة على المادة المضادة هو إثبات لهذا اللاتوازن في الكون. أما سبب كون العالَم غير متوازن، فما زال غيرَ معروفٍ. وربما كان عالمُنا وحدَهُ هو الذي يعاني عدمَ التوازنِ هذا؛ إذْ ربّما كان الكونُ المتعدِّدُ ككلٍّ - إنْ كانَ موجوداً فعلاً - متناظراً عموماً.

المسألة المتبقية هي: لماذا يوجد للفضاء ثلاثة أبعاد؟ أوّلُ فكرةٍ خاطفةٍ لتفسيرٍ محتَملٍ بدأتْ بالبروز من نظرية الأوتار string theory. كنّا ساكتين حتى الآن في هذا الفصل عن نظرية الأوتار، باستثناء لمحة سريعةٍ إلى وجودها أوردناها في حاشيةٍ، وذلك لأن النظرية مازالت تأمّليَّةً إلى حدٍّ بعيد. بيد أنّ ثمة بعضَ الدّلالات على أنّ نظريةَ الأوتارِ وثيقةُ الصّلة بالمراحل المبكِّرة جدًّا من نشوء الكون - وهذا ما يجب أنْ يكون عليه الحالُ إذا كانت نظريةُ الأوتار إحدى النظريات الأساسية في المادة - وأنَّ أبكرَ لحظةٍ في الكون لم تكنْ انفجاراً لجسيماتٍ، لكنْ كانت انفجاراً لأوتارٍ: أي انفجاراً لقضبانٍ من المعكرونة (السباغتي) spaghetti بدلاً من انفجارٍ لحبابٍ من القمح. فمثلاً، رأينا أنه كان لجميع القوى في الأوقات المبكرة جدًّا - ومن ثمّ في درجاتِ حرارةٍ عاليةٍ جدًّا، قبل أن ينهار التناظر - نفسُ الشِّدَّةِ. هذا ليس صحيحاً تماماً، لأنّ هذا يعني أنه إذا أُجريتِ الحساباتُ بتأنٍّ ورويَّةٍ فإن القوى التجاذبية والشديدة والكهربائية الضعيفة لا تتطابق تماماً في مقاديرها في الكون المبكّر جدًّا، أيْ في التَّكَّةِ الأولى



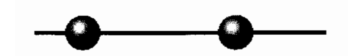
الشكل 8-11. رأينا في الفصل 6 أن القوى الأساسية تتقارب من قيمة مشتركة مع اقترابنا من لحظةِ (ودرجةِ حرارةِ) الانفجار العظيم. هذا ليس صحيحاً تماماً، بسبب وجود فرقٍ طفيفٍ بين هذه القوى في أوقاتٍ قصيرةٍ جدًّا. ويبدو أن هذا الانحراف يختفي عندما تتدخل نظرية الأوتار.

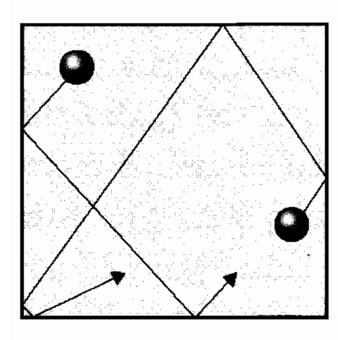
لميقاتيّة بلانك (الشكل 11-8) بيد أنه عندما تطبَّق نظريةُ الأوتار، فإن هذا اللاتطابقَ الطفيفَ يزول، وعندئذٍ تكون تلك القوى الثلاثُ متساويةً في لحظة ولادتها.

لقد رأينا أن إحدى السِّماتِ الرائعة لنظرية الأوتار هي أنها تقترح أن يكون للكون عشرةُ أبعادٍ مكانيّةٍ (أحد عشر بعداً، عندما نضمّ الزمن)، ستّةٌ منها موجودة في فضاء كالابي ـ ياو Calabi-Yau، حيث تمرّ الأوتار عبر الثقوبِ المتعدّدةِ الأبعادِ في هذه الفضاءات. يمكننا اعتبارُ الأوتارِ بأنها تُوَسِّعُ طريقاً واحداً، وأنّ الأوتارَ المضادّةَ anti-strings توسِّعُ الطريق المعاكسَ. وعند التقاء وترٍ ووترٍ مضادٍّ، فإنهما يفنيان، لذا يمكننا تصوير فضاءٍ ذي عشرة أبعادٍ بأنه يعجّ بأوتارٍ وأوتارٍ مضادّةٍ، وأنه يفنيها حيث تتلاقى. وفي الأمكنة التي لا تتلاقى فيها، فإن الأوتار تَمْنَعُ الفضاءَ من الانتشار، تماماً مثلما يفعل وترٌ حقيقيٌّ محيطٌ بلفَّةٍ من الورق.

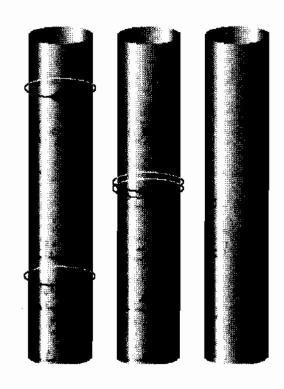
نحن بحاجةٍ الآن إلى حقيقة أبعد. ففي فضاءٍ وحيدِ البعدِ، مثل سلكِ المِعْدَادِ abacus، فإن نقطةً ونقطةً أخرى، هي نظيرتها من المادة المضادة، ستلتقيان قطعاً عمليًّا وتفني إحداهما الأخرى، شريطة ألاّ تكونا متحركتين بنفس

السرعة تماماً وبنفس الاتجاه. وفي بعدَيْن، مثل طاولةِ لعبةِ البلياردو، فإن تلاقي النقطتيْن أقلُّ احتمالاً (الشكل 8-12). وعندما نحاول، بدلاً من ذلك، التفكير في تلاقي الأوتار والأوتار المضادة، يتبيّن أن تلاقيها محتملٌ شريطة ألاّ تكونَ الأبعادُ أكثرَ من ثلاثة. يوحي هذا ـ وذلك ليس أكثر من اقتراحٍ مُغْرٍ في هذه المرحلة ـ أنّ الأوتارَ والأوتارَ المضادَّةَ التي يمكن التفكيرُ فيها بأنها تَبْقَى في ثلاثة أبعاد ملفوفة، فمن المحتمل أن يفني بعضُها بعضاً، وتحرِّرَ الأبعادَ الموافقة، وهذا يمكّنها من الانتشار والانبساط (الشكل 8-13). يعني هذا أن ثلاثة أبعاد تنتشر وتنبسط، وقبل أن تجد الأبعادُ الأخرى الوقتَ لتفعل ذلك، ينتقلُ الكون إلى مرحلته التالية، وربّما إلى التضخّم، تاركاً ستة أبعادٍ محجوزةً طوال الوقت.





الشكل 8-12. جسيمان محصوران في بعدٍ واحدٍ ـ مثل خرزتيْن في سلك (الشكل العلوي) ـ وهما لا بد أن يلتقيا إذا كانا متحركيْن ما لم تكن لهما السّرعاتُ نفسُها. لكنّ احتمال تلاقيْهما في بعديْن ـ مثل كرتيْ بلياردو على منضدةٍ ملساء (الشكل السفلي) ـ يتدنّى كثيراً.



الشكل 8-13. وتران، وترٌ وَوَترٌ مضادٌّ، يتحرّكان على بعديْن ملفوفيْن، سيلتقيان، ويفني أحدهما الآخر، تاركيْن البعد حرًّا في أنْ ينتشر وينبسط. ووفقاً لنظرية الأوتار، ثمة تلميحاتٌ إلى أنّ من المحتمل أن تتلاقى الأوتار في ثلاثة أبعاد، كما تتلاقى الجسيماتُ النقطيّة في بعدٍ واحدٍ. أما الأبعاد المتبقية فهي محجوزةٌ، لذا فلا ينتشر وينبسط سوى ثلاثة أبعادٍ تكوّنُ الأبعادَ الثلاثةَ لعالمنا المألوف.

لقد أطلنا الحديث عن الماضي، فماذا عن المستقبل؟ سأتناول مستقبلَنا المفترض أنه غير منتهٍ باختصارٍ أكثر من تناولنا ماضينا الذي يُزْعَمُ أنه منتهٍ. ثمة إجماع عامٌّ على أن لدينا مستقبلاً، ومستقبلاً طويلاً إنْ كنّا مهيّئين للحركة. سأختار نقطة انطلاقي مفترِضاً أنّ الكونَ ليس مغلقاً، ومن ثَمّ لن يحدثُ انسحاقٌ مستقبليٌّ: فالكون غيرُ منتهٍ حالياً، ثُمَّ إنّ مقياسَهُ سيتمدّد إلى الأبد. يبدو أن هذه هي الفكرةُ المقبولةُ عموماً للكوسمولوجيين. وثمة احتمال، دوماً، بأنهم على خطأٍ، وفي هذه الحالة، فالكون حالياً منتهٍ، وسينتهي بانسحاقٍ عظيم Big Crunch، ربما بعد بضعة تريليونات من السنين.

لا يكفي القولُ بأن من المحتمل أن يتوسّع الكونُ إلى الأبد، إذ يُوجد أيضاً عدد كبير من الأدلة على أن توسّعه متسارعٌ. لقد صَدَمَ هذا الكشفُ العالَمَ الكوسمولوجيّ لأنّ له نتائجَ بعيدةً في الكون. وعلينا التذكُّر أنّ هابل استعمل النجوم المتغيرة القِيفَاوِيَّةَ Cepheid لتعيين البعد عن المجرّات. وثمة طريقة بديلة هي استعمال مستعرٍ فائقٍ من النمط كوحدةِ قياسٍ معياريّةٍ لشدة الضوء. يتكوّن المستعرُ الفائق من النمط Ia حين يقوم قزمٌ أبيض - وهو نجم كتلتهُ قريبةٌ من كتلة الشمس، لكنه بحجم الأرض - قريبٌ من نظامٍ ثنائيٍّ binary system، بتجميع قدرٍ كافٍ من المادة التي يأخذها من جارِهِ، وتكون النتيجةُ خضوعه لتفاعلٍ نوويٍّ جَمُوحٍ. وخلافاً للمستعرات الفائقة من النمط II التي درسناها في وقت سابق، فإن المستعرات الفائقة من النمط Ia منتظمة جدًّا فيما يتعلق بكثافتها. لذا فإنها، كما هو الحال في النجوم المتغيرة القيفاويّة، تقوم مقامَ وحداتِ قياسٍ معياريةٍ لشدةِ الضوءِ، ويمكننا استعمالُ كثافاتِها المرصودةِ لمعرفةِ أبعادها عنا. وهناك فائدةٌ أخرى تتجلّى في أن المستعر الفائق أسطعُ كثيراً من النجوم القيفاوية، لذا يمكن استعمالها في دراسة أشياء أبعد بكثير منا.

وقد اكتُشف عام 1998 أن عدداً من المستعرات الفائقة البعيدة من النمط Ia كانت أبهتَ ضوءاً مما يجب إذا كان توسُّع الكونِ متباطئاً، أو إذا كان هذا التوسُّع يحدث حتى بسرعةٍ ثابتةٍ. وشريطة أن تكون الأدلة مادامت صحيحة، فلا بد من منحِ طاقةٍ إلى تلك الطاقة التي تُنْسَبُ إلى الخلاء، هذا المنح هو الذي

يسمى الثابت الكوسمولوجي cosmological constant، والذي كان أوّل من اقترحه هو آينشتاين، وذلك لموازنة السّحب التثاقليّ وإيقاف الانهيارِ الكونيِّ، ثم نَبَذَ آينشتاين هذا الاقتراحَ معتبراً إياه «أعظم تخبّطاته» عندما بلغته نتائج هابل، وقد حانت البداية الآن لإعادة التفكير في أنّ إقرارَ آينشتاين وقبولَهُ «بأعظم تخبّطاته» هو في الحقيقة تخبط أشد[20]. إن الطاقةَ الغامضَة المسؤولةَ عن التسارع تُسمّى الطاقةَ المعتمة dark energy، أو بقدر أكبر من التخيّل، وذلك بالرجوع ثانيةً إلى أرسطوطاليس، فيمكن تسميتها على سبيل الدَّعابة الجوهرَ quintessence. إن أحد السيناريوهات الممكنة التي تنطلق من وجود ثابتٍ كوسمولوجيٍّ غيرِ صغريٍّ هو أنه بدأ عصر تضخميٌّ جديدٌ، وأنَّ تسارعَ الكونِ سيرتفعُ إلى معدّلاتٍ هائلةٍ في الوقت المناسب ـ وذلك بعد مليون تريليون تريليون سنة (10^{30} سنة)، أو نحو ذلك. وإذا كان الحال كذلك، سنتعرّض لبدايةٍ مفاجئةٍ لعزلةٍ مطلقةٍ تقريباً، مع البقايا الملتحمة لمجرتنا والمرأة المُسَلْسَلَةِ. وسأفترض أن طورَ التمدّدِ هذا السريعَ أُسِّيًّا لن يحدث قبل أن تكون أحداث أخرى قد جرت، لكنّ هذا غيرُ مؤكَّدٍ أبداً.

ستنطفىء الشمسُ بسرعةٍ إلى حدٍّ ما، وذلك بعد قرابة 10 بلايين سنة. ستنتفخ وتصبحُ عملاقاً أحمرَ، قطرُهُ يتجاوز كثيراً قطرَ مدارِ الأرض حول الشمس. لذا فإن نظرةً بسيطةً إلى هذا الأمر تسمح لنا لتوقُّعِ أنْ تغدو الأرضَ، نفايةً تسبح في مدارها. ستتعرض الأرض لِسَحْبٍ خلال اندفاعها بعنفٍ عبر المادّةِ الشمسيّةِ الرقيقةِ جدًّا والموجودةِ في جوارِهَا، ثم إن الأرض ستنتهي إلى الموت في الشمس بعد اتجاهها نحوها بحركةٍ لولبيّةٍ مدَّةَ 50 سنة تقريباً. وكلُّ ما يتخلّف من منجزاتنا سيُحدِثُ تلويثاً طفيفاً للشمس: ولن تكونَ أكثر من مجردِ إسهامٍ إضافيٍّ في عملية التلويث. وثمة احتمال هو أنه خلال عملية تحوُّلِ الشمسِ إلى عملاقٍ أحمر، وازديادِ سطوعِها مئاتِ المرّاتِ ممّا هو عليه الآن، فإنها

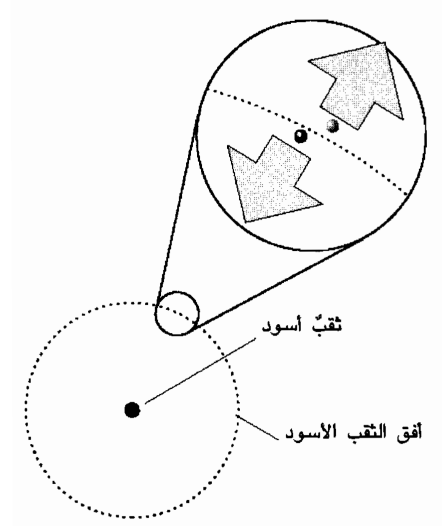
(20) عند الكلام عن تخبّطات آينشتاين، فإنني لا أرغب في تشويه إسهاماته الرائعة، إذ إن هذه التخبطات كانت نفسُها رائعةً، وإنني أتمنّى امتلاكَ القوةِ الفكريّةِ التي تمكّنني من الوقوع في هذه التخبطات.

ستدفعُ قدراً كبيراً من مادّتها إلى الفضاء، ومن ثَمَّ تصبح أقلَّ كتلةً. ويترتّب على السَّحْبِ التجاذبي الضعيفِ للكواكب من قِبَلِ الشمس التي هَزُلَتْ عمّا قبل، أن يتوسّع مدار الأرض، وقد يبتعد كثيراً كي نتفادى تحوُّلَنَا إلى رمادٍ. أما الزُّهْرَةُ، وهي جارتنا، فقد تفلتُ أيضاً. وخلال ذلك، ستتحوّلُ الشَّمسُ إلى قزم أبيض white dwarf كتلته تعادل نصفَ كتلةِ الشمسِ الحاليّةِ. هذا وإن النجومَ التي هي أكبرُ من الشمسِ، والتي مدة حياتها أقصرُ من النجوم التي هي أصغر منها، فستنتهي دراميًّا أيضاً، مكوِّنةً إمَّا نجوماً نيوترونيّةً، أو ثقوباً سوداء.

تستطيع المجرّات أن تظل حيّةً مادامت نجومها على قيد الحياة، تماماً مثل المجتمعات البشرية التي تظل على قيد الحياة مادامت البشريةُ موجودةً. وبناءً على ديناميّاتِ تكوُّنِ النجومِ وتطوُّرِهَا، وعلى الطريقةِ التي تدوِّرُ recycle بها المادةَ في مجرّاتها، فمن المحتمل أن يصلَ عصرُ تكوُّن النجومِ إلى نهايته بعد نحو مئة تريليون سنة (10^{14} سنة). وقبل ذلك بكثير، أي بعد قرابة 6 بلايين سنة، ستنشأُ صعوبةٌ طفيفةٌ محليّةٌ عندما تصطدم المرأةُ المسلسلةُ بدرب التّبّانةِ، لكنّ هذا يُعَدُّ، بالمقياسِ الكوسمولوجيّ، حَدَثاً قليلَ الأهميةِ. وعندما تتوقف عمليّةُ التكوُّنِ النجميّ، يمكننا التوقّع أنْ تكونَ المجرّاتُ مؤلّفةً من مزيجٍ متعادلٍ تقريباً من الأقزام البيضِ، والأقزامِ السُّمْرِ brown dwarfs (نجومٌ باردةٌ، لها كُتَلٌ صغيرةٌ لا تكفي لإشعالها؛ وكتلُهَا يجب أن تكونَ أقلَّ من كتلةِ المشتري بنحو 80 مرّة)، ومجموعةٍ غيرِ منتظَمةٍ من الثقوب السوداء. ومن الممكن أن يستمر التكوُّنُ النجميُّ ببطءٍ شديدٍ، وذلك عندما تتصادمُ هذه الأقزام السُّمْرُ، وتندمجُ معاً، ويصبحُ كِبَرُهَا كافياً لإشعالها. أمّا الأقزام البيض، فستتصادم أيضاً، وتلتحم لتكوِّنَ أقزاماً أكبر. كذلك فإن الثقوب السوداء سَتُجَمِّعُ نجوماً، وخلال نحو مئة تريليون تريليون سنة (10^{26} سنة)؛ فإن الثقوبَ السوداءَ المفترَض وجودها في مراكز المجرّات ستكونُ قد التهمتْ نجومَهَا. هذا وإنّ الثقوبَ السوداءَ الضخمةَ، التي كتلها قريبةٌ من 10 بلايين كتلةٍ شمسيةٍ، ستتجوّل في العالَم، مثلَ أسماك القرش، ملتهمةً النجومَ المنعزلةَ الصغيرةَ التي تبخّرتْ من المجرّات في عصور سابقةٍ. وإذا كانت هذه النجومُ أقزاماً صغيرةً، فستكونُ تفاعلاتُها النوويّةُ توقّفتْ

قبل زمنٍ طويلٍ، لكنّها سَتُصْدِرُ وهجاً ضعيفاً جدًّا مع إشعاعٍ نتيجةَ اضمحلالِ بروتوناتها التي أعمارها من مرتبة 10^{35} سنة، وستكون شدةُ الإشعاع بطيئةً إلى درجةٍ يجب عليكَ أن تكونَ فيها حسّاساً جدًّا لرصدها: فالقزم الأبيضُ النموذجيُّ الذي وقودُه يتكوّن من اضمحلال الأقزام البيض لهُ تألُّقٌ luminosity يعادلُ مصباحاً استطاعتُهُ 400 واط.

الثقوب السوداء تموت. هذا وإن إشعاع هُوكِنْغ Hawking radiationh، الذي تنبّأ بوجوده الكوسمولوجيُّ ستيفن هوكنغ S. Hawking عام 1974، يمكن التفكير فيه على النحو التالي: الخلاء Vacuum (وقد عرفنا سابقاً ما نعني بذلك) هو زَبَدٌ (رغوةٌ) مضطربٌ من الجسيماتِ والجسيماتِ المضادّةِ السريعةِ الزوالِ. وإذا فكّرنا في أن زوجاً مؤلّفاً من جسيمٍ وجسيمٍ مضاءً جاء إلى الوجود في أفقِ ثقبٍ أسودَ، وهو السطحُ المحيطُ بالثقبِ الأسودِ الذي يَحُدُّ منطقةَ الفضاء التي لا يمكن أن يفلتَ منها شيءٌ، عندئذٍ قد يَجِدُ جسيمٌ نفسَهُ تكوَّنَ داخلَ الأفقِ، ويجدُ شريكُهُ نفسَهُ تكوَّنَ في خارج الأفق (الشكل 8-14). وتكون النتيجةُ أن يُؤْسَرَ



الشكل **8-14**. إيضاحٌ لتكوُّنِ إشعاع هوكنغ، الذي يسبِّب فقدان مادة الثقوب السوداء، ومن ثَمَّ تتقلَّصُ. الثقب الأسود محاطٌ بأفقٍ له نصفُ قطرِ شواتزشايلد Schwartzchild، لا يستطيع الإفلاتَ منه شيءٌ، حتى الضوء. بَيْدَ أنه إذا تكوّن زوجٌ من جسيمٍ وجسيمٍ مضادٌّ (إلكترون وبوزترون، مثلاً) في الأفق، فقد يوجد الجسيمُ المضادُّ داخل الأفقِ، والجسيمُ قد يتكوّن خارجَ الأفقِ. وهذا يسمحُ للجسيْم بالإفلات، ومن ثَمَّ تنخفض كتلةُ الثقب الأسود. وقد تبيَّن أن لكثافةِ هذا الإشعاعِ السماتِ المميِّزةَ لإشعاعِ الجسمِ الأسودِ، بدرجةِ حرارةٍ متناسبةٍ عكسيًّا مع كتلةِ الثقبِ الأسودِ.

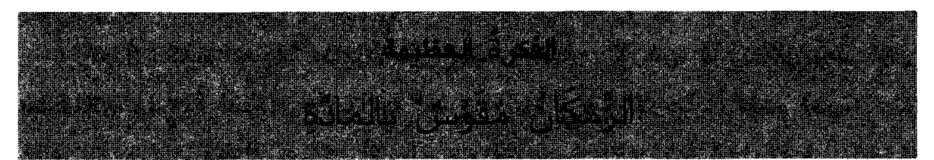
جسيْمٌ ويفلتَ الآخر. إن الجسيمَ الذي أفلت يحملُ طاقةً بعيداً عن منطقةِ الثقب، لذا فإن كتلة الثقب تنخفض. هذه العمليةُ جِدُّ بطيئةٍ. وفي حال ثقبٍ أسودَ كتلتُهُ تعادل كتلةَ مجرَّةٍ، فيمكننا التوقُّعُ بأن هذه العمليةَ تستغرق قرابةَ 10^{98} سنة. لذا يمكننا أن نستخلص من ذلك أنه بعد مُضِيٍّ زهاء 10^{100} سنة، يغدو الكونُ مؤلّفاً من إشعاعٍ كهرمغناطيسيٍّ، وإلكتروناتٍ وبوزيترونات. وفي الوقت المناسب، ستتلاقى الإلكتروناتُ والبوزيترونات، وسيُفْنِي بعضُها بعضاً، وتضمحلُّ لتصبحَ إشعاعاً كهرمغناطيسيًّا. هذا وإن الأطوالَ الموجيَّةَ للإشعاع في الكون ستتمدّد مع استمرار الكون بالتمدُّدِ، تماماً كما تمدَّد تألُّقُ الانفجار العظيم ليصبحَ إشعاعَ الخلفيّةِ المكرويَّ الموجَةِ للكونِ.

ومع تحوّلِ الكون ليصبح غيرَ منتهٍ، ستصبحُ الأطوالُ الموجيّةُ غيرَ منتهيةٍ أيضاً. ولن يبقى سوى الزّمكانِ المنبسطِ الميّتِ مع كلِّ آثارِ إنجازاتِنَا وطموحاتِنا، ووجودِنا الذي كان. لكنّ نهايتنا ليستْ مطابقةً لبدايتنا. ففي البداية كان العَدَمُ، العدمُ المطلَقُ. وبالمقابلِ، ففي النهاية، ثمة فضاءٌ خالٍ كُلِّيًّا. لذا ستكون سعادتنا غامرةً لأنّنا كنّا أحياءً في مرحلةٍ تميّزتْ بنشاطٍ متَّسِمٍ بالحيويّة والحماسة، مرحلةٍ واقعةٍ بين عهديْن من الانعزال الكئيب.

الفصل 9

الزَّمْكَانُ

مَيْدانُ الفِعْلِ



الزمانُ والمكانُ أسلوبان نستعملهما في تفكيرنا، وليْسا ظرفيْن، نعيش فيهما
ألبرت آينشتاين

ترى، هل يحدث أيُّ شيء؟ عندما ننظر حولنا، يبدو الجوابُ واضحاً. فنحن موجودون في المكان ونعمل في الزمان. لكنْ ما هو المكان، وما هو الزمان؟ هنا أيضاً، يبدو أنّ حدسنا يقدّم لنا إجابةً جاهزةً. نحن نفكّر في المكان بصفته مسرحاً - ربما غيرَ مادِّيٍّ، لكنه، مع ذلك، نوع ما من المسارح. لكنْ ما هو الزمان؟ الزمان يميِّز الأفعال المتتالية، الزمان مظهر للكون يسمح لنا بمعرفةِ الحاضرِ والحدِّ الدائم التغيّر بين الماضي والمستقبل. وبعبارة أخرى، الزّمان يفكِّك الأحداثَ المتواقتةَ؛ الزمان يميِّزُ المستقبلَ الذي تتعذّر رؤيته من الماضي الذي يتعذر تغييره. الزمان والمكان ينتشران معاً عبر المواقع بتتابعٍ منتظمٍ، وهذا يجعلهما قابلينْ للفهم. ينبثق العِلْمَ من وجود الزمان، لأن مصدره الرئيسي، السّببيّة causality - تأثير حدثٍ على الأحداث التي تعقبه - هي، أساساً، التتابع المنهجيّ للأحداث خلال الزمن: بمعنى أنه إذا حدث هذا الآن، فإن ذاك سيحدث بعد ذلك.

لكنّ مثل هذه التفسيرات للزمان والمكان أقربُ إلى العاطفة منها إلى المعرفة الحقيقية. قد تكون هذه التفسيرات نقطةَ البداية لفيلسوفٍ بدلاً من نقطةِ

النهايةِ لعالِمٍ. وكما سنرى في هذا الفصل، فإن تطور رؤيتنا الحاليّة للزمان والمكان نشأ من تحسينٍ لوجهةِ النّظر الحدسيّة التي مفادها أن العالَمَ مسرحٌ، ميدانٌ للفعل؛ لكنّ وجهة النظر هذه بدأت، خلال تطورها الحديث، بالاضمحلال. فبعض العلماء يرون حاليًّا أنهم على وشك اكتشاف فكرة أعظم حتى من تلك التي سنسردها في هذا الفصل.

تبدأ حكايتنا عندما بدأ الإنسان بقياس سطح الأرض، الذي كان يُعَدُّ ميدان نشاطاته. وفي الحقيقة، ما بدأ به ليس قياس كرتنا الأرضية، لعدم قدرته على ذلك، بل قياس أجزاءٍ منها. وتتجلى إحدى سمات المنهج العلميّ في تحديد الطموح بما يمكن إنجازه: فالعلم لا يحاول معالجة الأسئلة الكبيرة دفعةً واحدةً.

إن مفتاحَ فهمنا لأي شيء هو مجموعةٌ من الملاحظات، وبخاصة النوع الكّمّي منها، التي نسمّيها قياساتٍ، وطريقةٌ منهجيةٌ في التفكير نسميها منطقاً. وفي أولى الخطوات التي أدّت في النهاية إلى فهمنا الحاليّ لميدان الفعل، وفّر البابليّون والمصريون القياساتِ، واليونانيون المنطقَ. كان لدى البابليين إجراءاتٌ، لكنهم كانوا يفتقرون إلى البراهين التي قدّمها اليونانيون، وعلى سبيل المثال، عَرَفَ البابليون طوال آلاف السنين، قبل اليونانيين، أنّ مجموعَ مربّعي الضلعين القائمين في مثلثٍ قائمِ الزاويةِ يساوي مربَع الوترِ، لكنْ تُرِكَ لليونانيين إثبات صحة هذه العلاقة التي تصحّ في أي مثلثٍ قائم الزاوية ـ وربما أَجْرَى البرهانَ مجموعةٌ من الرياضيين يتزعمهم فيثاغورس. الإجراءات هي أساس المعرفة وأصل التطبيق، لكنّ البراهينَ تزيد من قوة التّبصّر، وتقودنا إلى فهم عميق.

سأتوقّف قليلاً عند نظرية فيثاغورس، لأنها تعلّمُ عدداً من الدروس الهامّة. وفي الحقيقة، سنرى أن عدداً من سِمَاتِ فهمنا الحاليِّ للمكان والزمان كان وارداً، في ثنايا أعمال فيثاغورس (500 ق. م. تقريباً)، وإقليدس (300 ق. م. تقرباً) وأبولونيوس (200 ق. م. تقريباً). وعمليًّا، نحن لا نعرف شيئاً عن هؤلاء الأشخاص؛ وبما أن معظمَ الحكاياتِ والنوادرِ التي رُوِيَتْ عنهم كُتِبَتْ بعد قرونٍ من موتهم، فلا يمكننا الاعتماد على أيّ شيء أُخبرنا به عنهم. ومع ذلك، فما زال

لدينا الكثير من فكرهم الاستثنائيّ، وهو كنزٌ لا يقدّر بثمنٍ من البراهين والتبصّرات في خاصّيّاتِ الفضاءِ الفارغ (الخالي) empty space.

●

سنستهلّ حديثَنَا بحكايةٍ، ولنتصوّر الطريقة التي ربما يكون سلكها الفاتحُ القديمُ لبلاد ما بين النهرين، حمورابي، في تفكيره للاستيلاء على تلك البلاد قبل نحو 3500 سنة. سنقبل أن حمورابي عاش في عالَمٍ يسوده كثيرٌ من الأشياء الغريبة، ليس أقلَّها الاعتقادُ بأن المسافاتِ من الشمال إلى الجنوب تُقاس بالأمتار، وأن المسافات التي تقاس من الشرق إلى الغرب كانت تقاس بالياردات.

وعندما قام مسّاحو حمورابي بمسح الحقول التي استولى عليها حديثاً، قاسوا أطوال أضلاعها. ولأسبابٍ غيرِ معروفةٍ تتعلّق بفرض الضرائب، قاسوا أيضاً أقطارها وسجّلوا هذه الأقطار إما بالأمتار أو بالياردات. وكما يُتَوَقَّعُ، فقد وجد حمورابي عدمَ انسجامٍ في الأعداد التي جمعوها. وعلى سبيل المثال، كان طول ضلعين متوازيين متجهين من الشمال إلى الجنوب في حقلٍ مستطيلٍ 120 متراً و 130 ياردة، وكان قطره 169 متراً، في حين كان طول ضلعين متوازييْن متجهيْن من الشرق إلى الغرب في حقلٍ مستطيلٍ آخر 131 ياردة وَ 119 متراً، والقطر 185 ياردة. لكن حمورابي كان مستغرِباً لأنّ الحقلين كانا يبدوان متطابقين.

وفي أحد الأيام خطرتْ له فكرةٌ مفاجئةٌ وبارعةٌ. فقد قرر إلغاءَ التقاليد القديمة المتعلّقة بالوحدات، وقياسَ جميعِ المسافاتِ بالأمتار. وبعد جهدٍ كبير، قدّم له مسّاحوه قائمةً جديدةً بأطوال الأضلاع والأقطار. عندئذٍ، رأى أنّ قياساتٍ مسّاحيةٍ غَدَتْ أفضل كثيراً وعمليةً جدًّا. فضلعا حقليْن كانا يبدوان متساويين هما 120 متراً و119 متراً، وقطراهما كانا 169 متراً[1]. وبتسجيل كلّ هذه القياسات

(1) أنا آخُذُ هذه الأرقامَ (وليس الوحداتِ بالطبع)، وكذلك تلك الموجودةَ في الأسفل من جدولٍ بابليٍّ يعود إلى عام 1700ق. م. تقريباً.

باستعمال نفس الوحدات، استنتج حمورابي أن لجميع الأشياء، التي لها نفس الشكل، نفسَ الأبعادِ، بقطْع النّظرِ عن اتجاهاتها.

سار حمورابي شوطاً أبعدَ من تنظيم القياسات في مملكته. فلم يكن لجميع الحقول في مملكته مساحةٌ واحدةٌ، وكان مسّاحوه يقدّمون إليه قوائمَ بالأضلاع والأقطار، التي حتى عندما كانت تُقاسُ بالأمتار، فقد كانت تبدو لهم عشوائيةً إلى حد ما. فمثلاً، كان مزارعٌ غنيٌّ يملك حقلاً ضلعاه 960 متراً و 799 متراً، وقطره 1249 متراً. وكان مزارع آخر أفقر منه يملك حقلاً ضلعاه 60 متراً و 43 متراً، وقطره 75 متراً. لكنّ حمورابي الخارقَ الذّكاءِ صاحَ فجأة بكلمةٍ وكأنه يقول «وجدتُها»، فقد رأى أنه إذا أخذنا أيّ حقلٍ، بقطع النظر عن مساحته، وربّعنا كلاًّ من طوله وعرضه وجمعناهما، فإننا نجد مربع القطر. أيْ أن كل قياسات المسّاحين كانت تحقق القاعدة:

(القطر)^2 = (الضلع الأول)^2 + (الضلع الثاني)^2

ولما كان حمورابي حاكماً شديد البخل، فقد أصدر الأوامرَ إلى مسّاحيه باختصار وقت عملهم، وذلك بقياسهم ضلعيْن فقط لكّل حقل. وفي الحقيقة، فقد أدرك أنهم حتى لو أصرُّوا على استعمال الوحدات الغريبة في مملكته، فما زال بإمكانه الحصولُ على القطرِ بكتابة:

(القطر)^2 = (C × الضلع الأول)^2 + (الضلع الثاني)^2

حيث C عاملٌ مطلوبٌ لتحويلِ الأطوالِ من ياردات إلى أمتارٍ، وكان هذا العاملُ (لثابت C) أساسيًّا في مملكته[2].

ويمكننا العودة إلى الوراء من صيغتنا الأسطورية لقاعدة حمورابي إلى قاعدته وفعاليته وضرائبه. الأهمّ من الاستفادة العمليّة من قاعدته حقيقةُ أنه حدّدَ

(2) قيمة C المسجلة هي: الياردة 0.9144 = متر. وقد كان علماء حمورابي يقضون قدراً كبيراً من الوقت لتعيين C بمقارنة قضبانٍ طولها متر بأخرى طولها ياردة. وكان يظن حمورابي أن في هذا مضيعةٌ للوقت، لذا أمرهم أن يحدّدوا C بالقيمة السابقة، وكانت النتيجة تعريف الياردة بدلالة المتر (كما نفعل اليوم).

عبارةً تلخِّص بطريقةٍ ما خاصياتِ المكانِ في بلاد ما بين النهريْن. إن الهنديّ غيرَ المعروف الذي كتب سَلْفَاسُوتْرَاسْ Salvasutras، وهو كتابٌ يقدِّمُ وصفاً للإجراءات التي يتّخذها كهنةُ العصر الفيداوي Vedic era (عام 500 ق. م. تقريباً) عند تقديمهم للقرابين، كان يعرف القاعدةَ، لأن طبقة البراهما كانت بحاجةٍ إلى تصميمِ وإنشاءِ مذابحَ مستطيلةِ الشكلِ بطريقةٍ موثوقةٍ. ثم إن الصينيّين، الذين أخرجوا كتابَ Jiuzhang suanshu، الذين جمعوا معلوماتِهِ في باكورة عصر هَانْ Han (الذي بدأ عام 200 ق. م. تقريباً) كانوا يعرفون القاعدة أيضاً.

وكما سنرى، فإن وجودَ قاعدةٍ خاصّةٍ للمسافة بين نقطتين، يقتضي وجودَ هندسةٍ، وهي وصفٌ للمكان، بدلالة النقاط والخطوط والمستويات والحجوم، الذي يمكن وجودها فيه. ولِتَعَرُّفِ هندسةِ المكانِ (الفضاء) الذي نسكنه، علينا تحديد تلك القاعدة. وقد تطلّب تعرّفُ حمورابي هندسةَ بلاد ما بين النهرين خطوتيْن: إذ كان عليه، أولاً، توحيدُ الوَحْداتِ units على طول المحاور الإحداثية المختلفة؛ ثم كان يتعيّن عليه إيجاد القاعدةِ التي تعيّن المسافةَ بين نقطتين. ولما كانت نفسُ قيمة C ونفسُ القاعدة مستعملتيْن في الهند والصين، فيترتّب على ذلك أنّ للمكان في الهند والصين نفسَ الهندسةِ المستعملةِ في بلاد ما بين النهرين. والبرهان على أن قاعدةَ حمورابي تسري على أيّ مكانٍ في العالَمِ (أو، هكذا كانوا يظنّون)، لا على ما بين النّهريْن فقط، ربما صاغه فيثاغورس ومدرستُهُ، لكنْ لا وجودَ لإثباتٍ قاطعٍ بأنهم فعلوا شيئاً أكثر من استعماله. وللحصول على إثبات المبرهنة علينا اللجوء إلى كتاب الأصول Elements لإقليدس، الذي ألّفه قبل نحو 2300 سنة، وصار يُطْبَعُ منذ ذلك الحين، لكنْ لا يوجدَ سببٌ لافتراض أن برهان إقليدس من إنجازه.

وجد إقليدس أنّ بوسعه استخلاصَ السِّماتِ المميِّزةِ للمكان، من ضمنها قاعدة حمورابي، وذلك استناداً إلى خمس دعاوى statements تبدو ظاهرياً واضحة، أسماها «مُسَلَّمَاتٍ» axioms. كان هذا حقًّا إنجازاً رائعاً. ولو كنتُ أكتب هذا الكتابَ قبل 2000 سنة، لَوَضَعْتُ مسلّماتِ إقليدس بصفتها فكرةً علميةً عظيمةً، لأنها، بمعزلٍ عن عيب طفيفٍ فيها، تُحَقِّقُ الشروطَ التي يجب أن تتّصف بها فكرةٌ كي تكونَ عظيمةً: فهي بسيطةٌ، غير أن لها نتائجَ غنيةً بلا حدود. العيب، بالطبع،

هو أنها خاطئة (بمعنى أنها توفّر وصفاً غير صحيح للمكان الذي نعيش فيه)؛ لكننا سنتجاهل التفصيلات مؤقتاً، ونقدّم لإقليدس الاحترامَ الذي يستحقه دون ريب.

لقد ضغط إقليدس وَصْفَهُ للمكانِ في الملاحظات الخمس التالية:

1. يمكنُ رَسْمُ خطٍّ مستقيمٍ بين أي نقطتين.
2. يمكن تحديدُ الخطّ المستقيم في كلا الاتجاهين دون حدود.
3. يمكن رسمُ دائرةٍ مركزها أيّ نقطة، ونصفُ قطرها أيُّ عددٍ.
4. جميعُ الزوايا القائمة متساوية.
5. من أي نقطة خارج أيّ خطٍّ مستقيمٍ، يمكنُ رسم مستقيمٍ واحدٍ فقط موازٍ للمستقيم الأصلي.

(لقد بَسَّطْتُ الدعاوَى إلى حد ما، لكنني احتفظت بجوهرها). تسمّى المسلمةُ الخامسةُ مسلّمَة التوازي. وهي مسؤولةٌ عن إحباطاتٍ كثيرةٍ حلّت بكثيرٍ من الرياضيين ربما أكثر من أيّ دعوى أخرى في علم الرياضيات، ذلك أن صيغتها المعقّدة جعلت الكثيرين يعتقدون بأنها ليستْ مسلّمةً، إنما هي دعوى يجب إثبات صحتها استناداً إلى المسلّمات الأربع الأخرى. وقد أضاع كثيرون أعمارهم سدًى محاولين ذلك دون أن ينجحوا في استنتاجها من المسلّمات الأربع الأخرى. ونحن نعرف الآن أنها مستقلة عن المسلّمات الأخرى، وأنّ من الممكن إيجادَ هندساتٍ مقبولةٍ أخرى، وذلك بالاستعاضة عن مسلّمة التوازي بمسلماتٍ أخرى، مثل:

′5. من أيِّ نقطةٍ خارج أيّ خطٍّ مستقيمٍ، من المستحيل رَسْمُ أيِّ مستقيمٍ موازٍ للمستقيم الأصلي.

أو حتى:

″5. من أيّ نقطة خارج أيّ مستقيم، يمكن رسم عددٍ غير منتهٍ من المستقيمات بحيثُ توازي جميعُها المستقيمَ الأصليَّ.

يسمى وصفُ الفضاء الذي يَستعملُ مسلّمةَ التوازي لإقليدس هندسةً إقليديّةً؛ وتُسمّى الأوصافُ المستندةُ إلى مسلّماتٍ بديلة هندساتٍ لاإقليديةً.

سنتقيد الآن بالهندسة الإقليدية، لأنها، بالطبع، تبدو ملائمة للفضاء الذي نعيش فيه. هذا وإن الكتب الثلاثة عشر التي كتبها إقليدس تُبَيِّنُ أنّ ثمةَ عدداً هائلاً من الخاصّيّات يمكن استخلاصُهَا من المسلّمة الخامسة، وأنه ثبتتْ صحةُ هذه الخاصّيّات حين اختبارها بالقياسات الفعليّة. إحدى نتائجِ هذه المسلمات، وبخاصةٍ المسلّمة الخامسة، هي مبرهنة فيثاغورس، التي أَوْرَدَ برهانَهَا في آخر كتابه الأول. لذا فإن قاعدةَ حمورابي الخاصةَ بالمسافة نتيجةٌ لمسلمات إقليدس، وهندسة حمورابي إقليدية أيضاً.

حتى الآن، عبَّرنا عن الهندسة الإقليدية في المستوي، وهو منطقة لها بعدان، مثل سطح ملاءةٍ من الورق. بَيْدَ أننا جميعاً نعرف، أو نظن أننا نعرف، أننا نعيش في فضاءٍ ثلاثي الأبعاد فيه ارتفاعاتٌ وانخفاضاتٌ إضافةً إلى حرّيّة الحركة في المستوي. من السهل توسيع مبرهنة فيثاغورس إلى الفضاء ذي الأبعاد الثلاثة باحتواء طول الضلع الإضافي، فنجد الصيغة التالية:

$$(\text{القطر})^2 = (\text{الضلع الأول})^2 + (\text{الضلع الثاني})^2 + (\text{الضلع الثالث})^2$$

لسنا ملزمين بالتوقّف هنا. فالرياضيون يملكون شغفاً لا حدودَ له بالتعميم، وهندسة إقليدس أرضٌ خصبة للتعميم. ومع أنّ معظمنا لا يستطيع تصوّر أيّ شيء يتجاوز أبعاد أرضنا الثلاثة، فمن الممكن التعبيرُ عن خاصّيّات هذه الفضاءات باستعمال دساتير. وهكذا، من الممكن كتابة دستور فيثاغورس في فضاءٍ رباعيّ الأبعاد بالشكل:

$$(\text{القطر})^2 = (\text{الضلع الأول})^2 + (\text{الضلع الثاني})^2 + (\text{الضلع الثالث})^2 + (\text{الضلع الرابع})^2$$

قد تظنُّ أنّ كلَّ ما نفعله عندما نفكّر في فضاءاتٍ أبعادها أكثر من ثلاثة هو مجرّد تسليةٍ عقليةٍ، لكنْ هذا غير صحيحٍ. فسنرى، على سبيل المثال، أن القدرةَ على التنقّل بين الأبعاد هي طريقةٌ قيّمةٌ لإدراك بنية عالمنا. أكثر من ذلك، هل يمكننا الوثوق بأنه لا يوجد سوى ثلاثة أبعاد في عالمنا الحقيقي، أم أن ثمة كثيراً من الأبعادِ الأخرى المحجوبَةِ عنّا بطريقةٍ ما؟ رأينا في الفصل 8 أنه لا

يمكننا معرفة الجواب، إذ إننا قد نسكن في عالَمٍ لفضائه عشرةَ أبعاد، أحد هذه الأبعاد هو الزمن.

سبق لي أن ذكرتُ أننا عاجزون عن تصوّر أكثر من ثلاثة أبعاد. هذا ليس صحيحاً تماماً. فبعض النّاس الذين قضوا حياتهم يدرسون هندسات فضاءاتٍ لها أبعاد كثيرة يَدَّعُونَ أن لديهم فكرةً، ولو أنها غير جليّة تماماً، عن العلاقات الموجودة في فضاءاتٍ رباعيّةٍ، لا ثلاثيةٍ، الأبعاد، وهم يعرضون على شاشات حواسيبهم صوراً مذهلة لشرائح ثلاثية الأبعاد لعوالِمَ رباعيةِ الأبعادِ (الشكل 9-1)[3]. لن أطلب منك أن تُعْمِلَ عقلَكَ بهذه الطريقة، لكننا نحتاج، بغية الاستعداد لما هو آتٍ، إلى بعض الأُلفة بالصور التي تمثّل مناظرَ في فضاءٍ رباعيِّ الأبعادِ. ولإنجاز هذا، علينا أن نتذكّر أجزاء من مسار الثورة الفكرية التي استهلّها الرسامون الإيطاليون في أواخر القرن الثالث عشر وأوائل القرن الرابع عشر، من أمثال جيوتي دي بوندوني Giotto di Bondone بييرو ديلا فرانشسكا Pirro della Francesca، اللذيْن بدآ بالتعبير عن الأبعاد الثلاثة في لوحاتٍ ذاتِ بعديْن، وكان



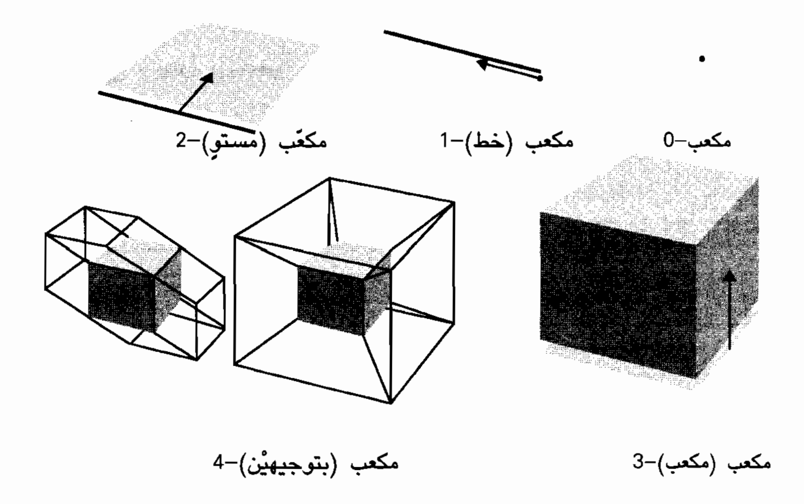


الشكل 9-1. تلميحٌ لأشكالِ الأجسام في الفضاءِ المُفْرِطِ hyperspace التي يمكن الحصول عليها بواسطة صورٍ وإحياءاتٍ animations. لدينا هنا منظران لإحياء دوران دولاب منبسطٍ في أربعة أبعاد، وهو مُسقَطٌ في ثلاثة أبعاد، ثم قُدِّم في بعديْن.

(3) من الممكن العثور على صورةٍ مجسّمةٍ لمكعّبٍ مفرط hypercube دوّارٍ في الموقع:
http://dogfeathers.com/java/hypercube/html

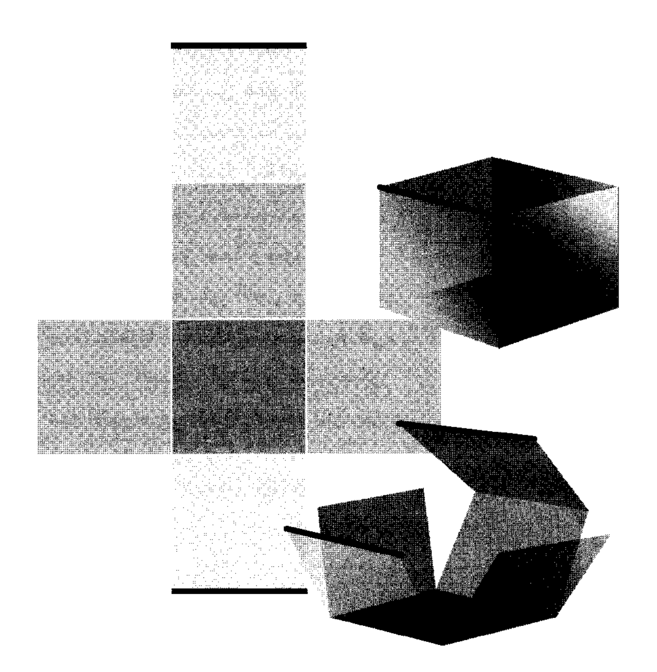
ذلك مبنيًّا على أسسٍ رياضية دقيقةٍ ابتدعها الرياضيُّ كَاسْبَارْ مُونْجْ G. Monge، وهو كُونْتْ بيلوز Pélouse (1746-1818)، في أواخر القرن الثامن عشر، وضمّنها في كتابه بعنوان الهندسة الوصفية Géométrie descriptive (1798). بعد ذلك، علينا السّيْرَ شوطاً أبعد لرؤية القليل عن الكيفية التي يمكن بها تمثيل المناظر الرباعيّة الأبعاد بصورٍ ثنائية البعد، أو بمساقطَ ثلاثيةِ الأبعادِ. يبدو هذا كلُّهُ شيئاً معقّداً إلى حدٍّ ما، لأنه يشبه طلبَنَا من نملةٍ، كانت طوال حياتها مقيّدةً بعالَمٍ منبسطٍ، أن تستعملَ خيالها لتفكّر في المرتفعات والمنخفضات أيضاً. لكننا ننعم بعقولٍ أفضل من النّمل، لذا يُمكننا إنجاز بعض التقدم.

المكعّب الصِّفريُّ البعد (المكعّب-0) هو نقطةٌ. فَكِّرْ في المكّعب-0 بأنه نقطةٌ معلَّمةٌ بقلم رصاص، عندئذٍ يكون المكعّبُ الأحاديّ البعد 0 (المكعب-1) خطًّا مرسوماً بقلم الرصاص على طول مسطرة (الشكل 9-2) والمكعبُ الثنائيُّ البعدِ (المكعب-2) مستوياً يُولَّد بجر المكعب-1 (الخط المستقيم) في البعد الجديد المتعامد مع الأول. هذا كله يسهل تصورنا له، ويمكن لنملة ذكية أن تفعل ذلك، ويسهل تنفيذه على ملاءةٍ ورقيةٍ ثنائية البعد. المكعب الثلاثي الأبعاد (المكعب-3) هو شكل نراه في حياتنا اليومية، ويولّد بجرّ مكعب-2، أي مستوٍ، باتجاه العمود عليه. ويجب ألاّ توجد مشكلة في تصور هذه الخطوة، مع أن النملة ستصاب بالذهول لأنها لا تستطيع رؤية وجود اتجاه عمودي ثالث. وأيضاً لا وجود لمشكلة في تمثيل مكعب-3 على ملاءة ورقية ثنائية الأبعاد؛ أي على ملاءة عادية من الورق، لأننا الآن متآلفون مع رؤية تمثيلات في الفن لأشكالٍ ثلاثية الأبعاد مرسومةٍ على لوحاتٍ ثنائية البعد. ولمساعدة النملة التي أصيبت بالذهول، يمكننا عمل ما يلي: نَقُصُّ مكعباً وفق بعض حروفه. وننشره ليصبح مستوياً (الشكل 9-3)، ونخبر النملة كيف يمكن ضمّ هذه الأجزاء معاً لتكوِّن مكعباً-3. ستصاب النملة بالذهول من الطريقة التي سلكتُها في لصق الحروف التي علَّمْتُها بخطٍّ غامقٍ، لكنها ستحصلُ، في الأقلّ، على فكرةٍ غامضةٍ عمّا يعنيه مكعّبٌ-3 وربما تصبحُ قادرةً على تفسير تمثيلاتنا الثنائيّة البعد لمكعبٍ-3، وهذا يتضمن آراء طريفةً في أن النملة ستُقْسِمُ أننا كنا نُطْلِعُها على شكل مسدّس.



الشكل 9-2. يمكن إنشاء مكعباتٍ في أبعاد مختلفة بواسطة تحريك المكعب السابق باتّجاه عموديٍّ جديد. ونرى هنا مجموعةً من المكعبات بُنِيَتْ من مكعبٍ-0 (نقطة). ونحصل على خطٍّ (مكعبٍ-1) بجر النقطة باتجاه واحد، وعلى مستوٍ (مكعبٍ-2) بجر الخط باتجاه عمودي عليه، وعلى مكعبٍ عاديٍّ (مكعب-3) بجر المستوي باتجاه عمودي جديد عليه. لقد تعلّمنا تفسيرَ التمثيل الثنائي البعد الحاصل للمكعب. وأخيراً، يمكن إنشاء مكعب مفرط رباعي الأبعاد (مكعب-4) بجرّ المكعب-3 باتجاه عمودي آخر. ونحن البشر لم نتعلّم بَعْدُ كيف نفسِّر الشكل الناتج: وهنا أبيّن منظريْن ينتجان من تدوير المكعّب المفرد باتجاهين مختلفين.

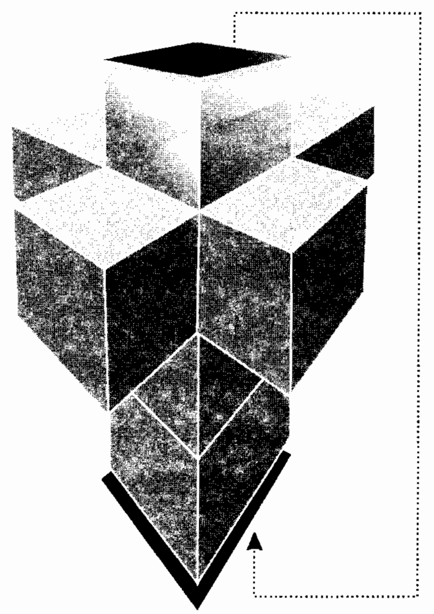
نحن الآن نعرف ما يكفي لإنشاء مكعب مفرط رباعيّ الأبعاد (مكعبٍ-4). إن قدْراً كبيراً من الرّياضيّات ينتجَ بالقياس (بالتشبيه) anology. وهكذا، فكما جررنا مكعباً-0 لبناء مكعب-1، وهلمّ جرا، فإننا نشىء مكعباً-4 بِجَرِّ مكعبٍ-3 (مكعبٍ عاديٍّ) باتجاهٍ عمودي على الأبعاد الثلاثة الأولى. والآن، نحن نملٌّ مصابٌ بالذهول، لأننا لا نستطيع تصور اتجاهٍ عموديٍّ على أبعادنا الثلاثة. وكما أن النملة لا تستطيع تصور بعد ثالثٍ، فبمقدورنا القيامُ بقفزةٍ ذهنية، ونقبل بوجودِ ذلك الاتجاه، ومحاولة فهمه بالقياس analogy، تماماً مثل النملة. ولمساعدتنا على فهم الصورة الثنائية البعد للمكعب-4 المبيَّن في الشكل 9-2، يمكننا الحصول على مخلوقٍ مفرطٍ hypergeing يُجري عملية قصٍّ على طول بعض وجوه المكعبات، ثم نشرها في ثلاثة أبعاد (الشكل 9-4)، وذلك تماماً مثل نشر مكعبٍ - 3 إلى ستة مكعباتٍ-2 ونشْر مكعبٍ-4 إلى ثمانيةِ مكعباتٍ-3 (يوجد مكعب-3



الشكل 9-3. يمكن إنشاء مكعب عادي في فضاء ثلاثي الأبعاد من الشكل الشبيه بالصليب المكوّن من ستة مربعات، وذلك بلصْق الأضلاعِ المتجاورة وطيّ الشريطِ الطويلِ ووصْلِ الحروف المعلَّمةِ بخطٍّ غامقٍ. من السهل علينا رؤية أنّ البعدَ العموديَّ على الورقةِ يمكن استعمالُهُ لوصْلِ الحروف الغامقة، لكنْ من الصعب رؤيته من قِبَلِ مخلوقٍ مقيَّدٍ ببعديْن.

مخفيّ في مركز الصليب العلويّ)[4]. ولتصوُّر كيف يمكن إنشاء المكعب-4 من المكعبات-3 الثمانية التي تكوّن وجهه، فإننا نتصورها ملصقةً معاً. نحن القارئين في الفضاء الثلاثي الأبعاد، الذين نشبه النمل في الفضاء ذي البعدين، نجد أن من المستحيل تصوُّرَ كيف أنّ الوجهين المعلَّميْن، مثلاً، يمكن وصلُهما، تماماً مثل نملةٍ في فضاءٍ ثنائيّ البعد تعاني مشكلةً مشابهةً مع الفضاء الثلاثي الأبعاد. أما القارىء في فضاء رباعي الأبعاد فلا يجد أي صعوبة في ذلك.

(4) لقد عرف الرسّام العالميُّ سلفادور دالي ذلك. إن الفرق بين لوحة Piero della Fransesca المعروفة باسم جِلْدِ المسيح (1460) Flgellation of Christ، ولوحةِ دالي المعروفةِ باسم الصَّلْب: جثّة من المكعبات المفرطة (1954) The Crucifixion: Corpus hypercubics يمثل التقدُّمَ الذي نسعى لإنجازه.



الشكل 9-4. سنضيف الآن بعداً جديداً أو ننشىء مكعَّباً مفرطاً من هذه المجموعة المؤلفة من ثمانية مكعباتٍ ثلاثيةِ الأبعاد (أحدها مستَتِرٌ داخل نقطة التقاطع)، وذلك بأن نلصقَ معاً الوجوهَ المتجاورة. يتعيّن علينا أيضاً أن نلصقَ معاً وجهَيْن أشرنا إليهما بالمستويَيْن الغَامقي اللون وبالخطوط المنقطة. وبصفتنا مخلوقاتٍ محصورةً في ثلاثة أبعاد، من الصعب أن نرى كيف يمكن تنفيذ هذا الإجراء في ثلاثة أبعاد، لكن من السهل رؤيته في أربعة أبعاد.

اكتملت الهندسةُ الإقليديةَ في القرن السابع عشر، عندما استند إسحاق نيوتن (1643-1727) إلى أرصاد غاليليو ـ كما رأينا في الفصل 3 ـ وأضاف إلى وصف إقليدس السكونيّ static للفضاء وصفاً للحركة عبر الفضاء. وكي يفعل ذلك، قدّم نيوتن فكرة القوة force، وهي تأثيرٌ يدفع بالجسيمات بعيداً عن مساراتها المستقيمة، ويجعلُهَا تتحرك بسرعاتٍ مختلفةٍ. وفي سياق نقاشنا الحاليّ، يُمكننا النظرُ إلى إسهامِ نيوتن بصفته أوّلَ محاولةٍ ناجحةٍ لدمج الزمان بالمكان. حاول أرسطوطاليس ذلك، لكنْ لم يحالفه النجاح، لأنه لم يقدّرْ قوةَ الهندسة في فرض المسارات: فمن تجربته للأشياء الأرضية، ظن أن القوى كانت ضروريةً لإبقاء الجسيمات متحركةً بانتظام على خطوطٍ مستقيمةٍ. أما نيوتن، فقد أدرك قدرةَ الهندسة على تعيين مسارات الجسيمات، فقدّم مفهوم القوة للتعبير عن الانحرافات عن الحركة الطبيعية، التي عدّها الحركة المستقرة (المنتظمة) على طول خط مستقيم.

وفيما يتعلق بنيوتن، كما هو الحال مع أرسطوطاليس الذي عاش قبله

بألفي عام، كان الزمان والمكان مطلقيْن، فالمكان مسْرَحٌ يتقاسمه كلُّ الممثلون، والزمان وسيطٌ يسجِّل انقضاء الوقت لجميع هؤلاء الممثلين. فقد قال:

المكان المطلق، بطبيعته الخاصة، الذي ليس له علاقة بأي شيء خارجي، يظلّ دائماً متشابهاً وراسخاً... الزمان المطلق، الحقيقي والرياضي، بطبيعته الخاصة، ينساب باطّرادٍ دون أن يكون له علاقة بأي شيء خارجي[5].

فإذا كان هذا اليوم بالنسبة إليّ هو الثلاثاء، فهو يوم الثلاثاء لأي شخص، وإذا أمضيتُ ساعةً، فكلّ شخصٍ يُمضِي ساعة. وإذا كان مراقبٌ يرى أن المسافةَ بين نقطتين كيلومترٌ واحدٌ، فإن جميعَ المراقبين سَيَرَوْن أنها كيلومترٌ واحد. وبعبارة أخرى، المكان مسْرحٌ راسخٌ مطلَق، وللزمان تكتكة عالمية واحدة.

إن مفهومَ القيامِ بفعلٍ من بُعْدٍ، كأن يستطيعَ نجمٌ حَنْيَ مسارِ كوكبٍ بعيدٍ عنه ليصبحَ هذا المسارُ قريباً من دائرةٍ حول النجم، كان في الماضي شيئاً مُحَيِّراً. وقد رأى نيوتن نفسُهُ أنّ هذا عيبٌ في نظريته، بيد أنه كان ينعم برؤية ذرائعية (براغماتية) لقدراته، وكان قانعاً بترك هذه المحيّرةِ لعلماء من بعده: كان من الذين يمضغون اللقمة برفق، لا ممّن يزدرونها بسرعة. والعالِمُ الذي حلّ هذه المحيّرة، دون عونٍ من أحدٍ تقريباً، هو آينشتاين، وسنرى فيما تبقّى من هذا الفصل، الفهمَ العميق والمتميّزَ الذي نَعِمَ به هذا الرجل.



لقد دفع ألبرت آينشتاين (1879-1955) الحضارةُ قُدُماً إلى الأمام على مرحلتين: في أولاهما، قام بربط المكان بالزمان بطريقةٍ أعمق من نيوتن. وبهذا قضى على مفهوم المكان والزمان المطلقيْن، ومحا التكتكة العالمية الواحدة للزمان. وقد ألغى في المرحلة الثانية أحد أهمّ إنجازات نيوتن، وهو مفهوم الثقالة الكونية بصفتها قوةً. غالباً ما تُحَلُّ الأحجياتُ والمحيّراتُ العظيمةُ بالإلغاءِ، وعلى العلماء أن

(5) من الكتاب الشهير لنيوتن بعنوان الفلسفة الطبيعية للمبادىء الرياضية Philosophiae naturalis principia mathematica (1687).

يستمتعوا بقلبِ المفاهيمِ الرئيسية، من ضمنها ما يخصُّهم منها[6]. وسننضمّ إلى آينشتاين في هاتين المرحلتين. الثانية منهما، وهي العظمى، لم يكن لها أن تتحقّق دون سابقتها، ونحن بحاجةٍ إلى استيعاب ما قدّمه إذا عزمنا على أن نفهم بعمق حقًّا ما الذي نفطنه، ومتى وأين حدث ذلك.

كان أوّل إنجاز لآينشتاين نظرية النسبيّة الخاصة. هذه النظرية هي وصف للملاحظات التي يجريها الناسُ عندما يقومون بحركةٍ نسبيةٍ منتظمة وغير متسارعة. كانت فكرةُ آينشتاين المركزيةُ هي أنه يستحيل على أيٍّ كان يسير بحركةٍ منتظمةٍ أن يكتشف، دون أن يطلَّ من النافذة، ما إذا كان متحركاً أم لا. وقد عبّر آينشتاين عن هذه النتيجةِ بإيجازٍ بليغٍ بقوله إن الأطر العطالية متكافئة: «الإطار العطالي» inertial frame هو، ببساطة، منصّةٌ تتحرك بسرعةٍ منتظمةٍ وبخطٍّ مستقيمٍ؛ وكانت هذه الفكرةُ ماثلة في ذهن غاليليو في باكورة القرن السابع عشر عندما تصوّر السفرَ في حجرة محكمة الإغلاق ليس لها نوافذ في قاربٍ على بحرٍ هادئ: فلا يمكن عندها التصوّر بأن ثمة تجربةً تسمح بكشف ما إذا كان القارب متحركاً أم لا. ولإيراد مثالٍ حديث على إطار عطاليٍّ، يمكننا تصوّرُ أنّ تجاربَ تُجْرَى داخلَ طائرةٍ تندفعُ بسرعةٍ ثابتة: فإذا اشترطنا عدم وجود إطار إسناد في العالَمِ الخارجيّ، فلا يمكننا كشفُ حركةِ الطائرةِ. التّباين الجوهريّ بين غاليليو وآينشتاين، وبين القرنين اللذيْن يفصلان بينهما، هو أنه أُتيح لآينشتاين معلوماتٌ عن الكهرباء والمغناطيسية، وأيضاً عن ديناميّة الأجسامِ المتحركةِ (النوّاس، وغيره).

لرؤية أهمية فكرة آينشتاين عن تكافؤ الأُطُرِ العطاليّةِ، لنفترض أننا، أنتَ وأنا، مؤلِّفان لكتبٍ دراسيّةٍ. أنا أعدّ نفسي مستقرًّا في مختبر حيث أُجري سلسلة من القياسات؛ فكّر أنّك موجودٌ في مختبرٍ يتحرك بالنسبة إليَّ بحركةٍ مستقيمةٍ بسرعة 000 000 000 1 كيلومتر في الساعة (كم/سا؛ وهذه سرعة قريبة من

(6) أنا أتحدث عن عالَم مثالي. لست واثقاً أبداً بأن نيوتن كان سيتقبل أفار آينشتاين بسعة صدر. لقد تقبل نيوتن انتقادات عدد قليل جدًّا من معاصريه، وفيما يتعلق بأي عالِمٍ، حتى من كان متواضعاً ظاهريًّا، فإنه لن يرحب بقلب أفكاره خلال حياته.

93 بالمئة من سرعة الضوء، وبها يلزمنا 0.14 ثانية للقيام بدورة كاملة حول الأرض). وخلافاً لمعظم المؤلفين، الذين يعتمدون على عمل الآخرين لتجميع نصوصهم، فقد قررنا، أنت وأنا، تنفيذ جميع التجارب الكلاسيكية ـ إسقاط غاليليو لكراتٍ من برج بيزا المائل، اكتشاف فاراداي Faraday للتحريض الكهرمغناطيسيّ، البحث غير المثمر لميكلسون ومورلي عن دليل على حركة عبر الأثير، وهلم جرًّا. كان رأي آينشتاين أنهما، جوهرياً، سيكتبان نفس الكتاب مع أنك تسير بسرعة 000 000 000 1 كم/سا بالنسبة إليّ. وبالطبع ستكون كلماتنا مختلفة، لكن الفيزياء التي نعلّمها ستكون غير قابلة لتمييز إحداها من الأخرى. وإذا تبادلنا الكتابين، فسأستعمل كتابك تماماً كما تستعمل كتابي. إن تكافؤ كتابينا يمتد إلى الفيزياء كلها، لا إلى مجرد الجسيمات المتحركة (غاليليو)، لكن، أيضاً، إلى الكهرباء والمغناطيسية (آينشتاين).

والآن، نصل إلى النقطة المركزية. إن كثيراً من المعادلات في الفيزياء، وبخاصة تلك التي تصف الكهرباء والمغناطيسية، تعتمد على سرعة الضوء c[7]. المسألة هي: في كثير من فصولي التي تتناول الكهرمغناطيسيةَ، تتطلب العباراتُ التي أستعملُها قيمةً خاصةً لِـ c، التي قسْتُها في مختبري. والعباراتُ التي توردُها في فصلِكَ تستعمل أيضاً قيمة معينةً لِـ c، وكي أتمكن من تعليم الفيزياء باستعمال كتابكَ، فإن قيمة c التي قستَها أنتَ يجب أن تكون نفس القيمة التي حصلتُ عليها أنا من قياساتي. وبعبارةٍ أخرى، فعندما تقيس c، فأنت تقيس نفس القيمة بالضبط مثلي، لكنك تتحرك بسرعة 000 000 000 1 كم/سا بالنسبة إليّ، وبهذه الطريقة فقط يكون كتابك منسجماً مع كتابي.

إن لحقيقةِ كونِ راصديْن، في إطاريْن عطاليّين مختلفَيْن يسافران بسرعتين مختلفتيْن (أنت وأنا)، يقيسان نفسَ السرعةِ للضوء، نتائجَ جوهريةً في فهمنا للمكان والزمان. إنها تقضي على مفهوم التزامن الشامل، وتلغي، مثلاً، مفهوم المكان بصفته ميداناً منعزلاً، ولأن هذه الملاحظات تقضي على كلّ شيء رُبِّينَا

(7) تعوّد العلماء إنفاق الكثير من الوقت في قياس قيمة c. وقد عُيِّنَتْ هذه القيمةُ الآن بالعدد c=299 792 458 م/ثا، ولم تعد سرعة الضوء مقداراً علينا قياسه.

على الإيمان به، فهذه لحظةٌ حاسمة لمراجعة فهمنا للطبيعة. لذا فنحن بحاجةٍ إلى أن نرى بدقة أعلى ما يترتب على ذلك.

●

تُرى، كيف يمكن أن تقيس نفسَ القيمة لِـ c مع أنك تسافر بسرعة أعلى كثيراً بالنسبة إليّ؟ أحد الأجوبة هو أن قياساتِكَ للمسافة والزمن مختلفة عن قياساتي. فمثلاً، إذا كانت قضبان قياساتك أقصر من قضباني، وعقارب ميقاتياتكَ تدور بسرعة أبطأ، فإنك ستقدّمُ قيماً مختلفةً عن قيمي مع أننا نرصد نفس الظاهرة. لذا، فقد يحدث أن «التعزيز» الذي تعطيه لحزمة ضوئية بِبَثِّهَا من مصباحٍ يسير بسرعة أعلى بمقدار 000 000 000 1 كم/سا من سرعة مصباحي، يُلغَى بواسطة هذه التعديلات في إدراكك للمكان والزمان. أي أنّ التعزيز الذي تمنحه حركتُكَ لحركة الضوء يُلغَى كلّيًا بفضل هذا التغير في الإدراك. وقد اقترَحَ مثلَ هذه التعديلات، باستقلالٍ عن الغير، الفيزيائِيُّ الإيرلنديُّ جورج فيتزجيرالد G. Fitzgerald (1851-1901)، والفيزيائيّ الهولندي هندريك لورنتز H. Lorentz (1853-1928) وسميت هذه التعديلات تَقَلُّصَ فيزجيرالد ـ لورنتز Fitzgerald-Lorentz contraction. فكان إنجاز آينشتاين هو وضع هذه الاقتراحات المنشأة لغرضٍ خاصٍّ على أساسٍ نظريٍّ أعمق وأمتن، باقتراحه أنها كانت نتائج لهندسة المكان والزمان.

اندفع آينشتاين إلى قلب الموضوع وقد يكون تصوّر أنّ مسّاحي حمورابي كانوا مضغوطين بالوقت لإجراء قياساتهم عندما كانوا يُسرعون في اجتياز حقولهم. لكن المسّاحين الذي يتحركون بسرعات مختلفة في نفس الحقول لا بد أن يكونوا قدّموا أطوالاً وأقطاراً مختلفة، من ثمّ لن تنجح قاعدة حمورابي المتعلقة بالمسافة، لأن المسّاحين المختلفين قدّموا قيماً مختلفة لها، وذلك يعود إلى السرعة التي كانوا يتحركون بها وبالاتجاه الذي كانوا يسيرون وفقه. وفي طفرةٍ من التبصّر، فإن حمورابي الزائف وآينشتاين الحقيقي قالا إن تقديم تقرير عن موقع نقطة في الفضاء لم يعد كافياً: إذ يتعين على المسّاحين من الآن

فصاعداً تقديم تقرير عن موقعِ النقطةِ والوقتِ الذي سُجّل فيه الموقع وفقاً لميقاتياتهم. ونحن نسمّي هذا القياسَ المشتركَ حدثاً event. وقد اقترح آينشتاين أن «اللامتغيِّرَ» الحقيقيَّ، وهو الرقم الذي يتفق عليه الجميع، بقطع النظر عن سرعتهم، هو الفاصلُ interval بين حدثيْن. هذا وإن الفاصل بين حدثيْن منفصليْن في المكان بواسطة المسافة distance (كما يقيسها مسّاحٌ خاص) ومنفصليْن في الزمان بواسطة الزمن time (كما يقيسه نفس المسّاح)، يعرَّفُ كما يلي:

(الفاصل)^2 = ($c \times$ الزمن)^2 − (المسافة)^2

حيث تحسب المسافة باستعمال نفس العبارة التي رأيناها آنفاً. ولما كانت المسافةُ التي تقيسها بين المواقع المكانية لحدثيْن أصغرَ من المسافة التي أقيسها أنا، لكن الفاصل هو نفسه، فيجب أن يكون الزمنُ بين الحدثين أصغرَ أيضاً، وذلك للحفاظ على قيمة الفرق ($c \times$ الزمن)^2− (المسافة)^2. وبكلمات أخرى، يمضي الزمن بسرعة أبطأ من سرعته بالنسبة إليّ[8]. الزمن الذي يقيسه كلٌّ منّا يسمَّى الزمنَ الخاصّ proper time: وإنني أعتبر أن زمنكَ الخاصَّ يجري بسرعة أبطأ من زمني الخاص. ولما كنتَ تعتبرُ أنني أتحرك بالنسبة إليك، فأنت، أيضاً، تعتبر أن زمني الخاص يتقدم بسرعةٍ أبطأ من زمنك الخاص.

يتطلّب اقتراحُ آينشتاين مراجعةً جذريّةً لإدراكنا للزمان والمكان. فهو، أولاً، يلغي مفهوم التزامن الشامل (الكونيّ): فلم يعدْ بإمكان الراصدَين الموجودَيْن في إطارين عطاليين مختلفين الاتفاق على أن حدثيْن متزامنان. ولفهم هذه النتيجة، لنفترض أنك موجودٌ في سفينة فضائية تعرف أن طولها 100 متر. إنك تتجاوزني بسرعة 000 000 000 1 كم/سا. وأنا ألاحظ موقع طرفي السفينة الفضائية في لحظة معينة، وأجد أنهما منفصلان أحدهما عن الآخر بمقدار 38

(8) نحن لسنا بحاجةٍ إلى التفاصيل، لكن بغية التمام، إذا عرفتَ أن طول سفينتك الفضائية هو الطول length، عندئذٍ يكون الطول الذي أقيسه هو الطول × [1− (السرعة)^2]$^{1/2}$، حيث السرعة speed هي سرعتك بالنسبة إليّ معبَّراً عنها بمضاعفٍ لسرعة الضوء. وبسرعة 100 كم/سا (قرابة 60 ميلاً في الساعة)، فإن [1 − السرعة)^2]$^{1/2}$ تختلف عن 1 بنحو جزء في 100 تريليون، لذا لا بد أن يكون حمورابي نسيَ تماماً الحاجة إلى أن يهتمّ بالسرعة التي كان يسير بها مسّاحوه لإجراء القياسات.

متراً فقط. الانفصال في الزمن بين حَدَثَيَّ (القياسيْن) صفر، لأنهما متزامنان. لذا فإن الفاصل بينهما هو نفس الفاصل المكاني الذي أقيسه، وهو 38 متراً. أنت تعرف أن طول سفينتك الفضائية هو 100 متر، ومن ثم فكي يكونَ الفاصلُ نفسَهُ، فإن الزمن الذي تقيسُهُ أنت بين الحدثيْن لا يمكن أن يكون صفراً. وفي الحقيقة، فإنك تظن أن الزمن بين قِيَاسَيَّ 0.31 مكروثانية! واختصاراً، فإنك لا تعتبر الحدثين متزامنيْن. إن موثوقية مفهوم التزامن اختفى، إذ لا يمكن لراصديْن يقومان بحركة نسبية منتظمة أن يتفقا على تحديد الأحداث المتزامنة. وهكذا، وبعبارةٍ أخرى، فقد ولّى وانقضى فَهْمُ نيوتن للمكان والزمان المطلقيْن.

المراجعة الثانية للأفكار السائدة هي اندماج المكان والزمان. لذا سنقوم أولاً بإيضاح عبارة الفاصل interval. وكما ساعد حمورابي في تبسيط وصف ما بين النهرين بواسطة جعل القياسات. الشرقية - الغربية والشمالية - الجنوبية، تُجرَى بنفس الوحدات، فإننا، أيضاً، نستطيع تبسيطَ وصف المكان والزمان بجعل قياسات الزمان والمكان بنفس الوحدات. لكننا سنختار التعبيرَ عن قياسات الزمن «بأمتار رحلة الضوء» meters of light travel، وهي المسافة التي يقطعها الضوء في ذلك الزمن بعد ضربه بـ c. وهكذا فإن ثانية وحدة (1s) هي 300 000 كيلومتر، لأن هذه هي المسافة التي يقطعها الضوء في ثانية واحدة، ثم إن «متراً واحداً (1m) من الزمن» يكافيء 3×10^{-11} (30 بيكوثانية، أو 30 جزءاً في التريليون من الثانية) في الوحدات التقليدية. وعندما تنظر إلى عقرب الثواني في ساعة يدك وهو يتكتك، فكّر في أن كلّ تكّةٍ تشير أيضاً إلى 300 000 كيلومتر. هذا حديث ملائم لتدبير شؤون المنزل، لكنه يبسّط تعريف الفاصل ليكون:

$$(\text{الفاصل})^2 = (\text{الزمن})^2 - (\text{المسافة})^2$$

تماماً مثلما بسّط حمورابي تعريف مربع القطر من (C × الضلع الأول)^2 +(الضلع الثاني)^2 إلى (الضلع الأول)^2 + (الضلع الثاني)^2، وذلك بإصراره على أن يقدّم مسّاحوه الضلع الأول بالأمتار.

سنورد الآن نقطة هامة جدًّا. فكما أنّ قاعدة المسافة التي تعبِّر عنها مبرهنة فيثاغورس تلخص الهندسة في الفضاء الثنائي البعد، وأنه يمكن تعميم المبرهنة على فضاءاتٍ عدد أبعادها أكبر، فإن قاعدة آينشتاين للفاصل interval توحي بقوة أن من الضروري اعتبار الزمن بعداً رابعاً عمودياً على الأبعاد الثلاثة للفضاء. وهذا هو أصل ملاحظة هيرمان منكوفسكي H. Minkowski (1909-1864) التي قدّمها عام 1907، والتي تنص على ما يلي: من الآن فصاعداً، قُدِّر للمكان وحده، والزمان وحده، أن يمحلا ليتحولا إلى مجرد خيالين، ولن يحافظ على حقيقةٍ مستقلةٍ سوى نوعٍ من الاتحاد بينهما. إن اتحاد الزمان والمكان يسمى الآن زَمْكَاناً spacetime.

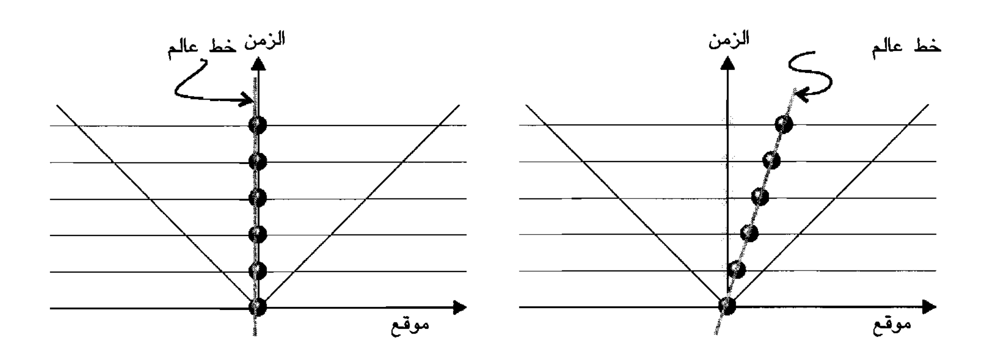
هذا وعلينا ألاّ نخلط بين فضاءٍ رباعيّ الأبعاد وزمكانٍ رباعي الأبعاد، لأن هندستيهما مختلفتان جدًّا: فالمسافة distance في الفضاء ـ 4 تعطَى بالقاعدة $t^2 + x^2 + y^2 + z^2$، في حين أن نظيرتها في الزمكان ـ 4، وهو الفاصل interval، تعطى بالقاعدة $t^2 - (x^2 - y^2 - z^2)$، أي $t^2 - x^2 - y^2 - z^2$. نحن نقول إن للفضاء ـ 4 والزمكان ـ 4 بصمتيْن متريّتيْن metric signatures مختلفتيْن. فالبصمة المترية للفضاء ـ 4 (نمط الإشارات في عبارة المسافة) هي (+,+,+,+)، في حين أن البصمة المترية للزمكان ـ 4 هي (- ,- ,- ,+). ربما بدأْتَ الآن بالحصول على فكرة سريعة عن جوهر الزمن، أو، في الأقل، عن تعريفه: الزمن هو الإحداثي الموافق للإشارة الوحيدة المختلفة عن الإشارات الأخرى في البصمة المترية للزمكان، وهي + لا -. إن عالَماً بصمةُ زمكانِهِ المتريةُ هي (- ,- ,+ ,+) لا بد أن يكون له بعدان للزمن، لذا فإن «هذا اليوم» يجب أن يكون قد تميّز بتاريخيْن. وإذا كان علينا تصوّر زمكاناتٍ لها أبعاد أكثر، كالزمكان الخماسيّ الأبعاد ذي البصمة المترية (- ,- ,- ,+)، فبإمكاننا أن نعرف مباشرة أن الإحداثي الأول هو الزمن؛ وقد قابلنا زمكاناتٍ لها أبعادٌ أكبر في الفصل 8، وهذا هو الأساس لتقرير ما إذا كان واحدٌ من الأبعاد الإضافية مكاناً أم زماناً. وخلال هذا الفصل سنعنى بالزمكان ذاكَ الذي له أربعة أبعاد، والذي بصمته المترية هي (- ,- ,- ,+).

عليّ الاعتراف بأن هندسةَ الزمكانِ، التي تسمى هندسة منكوفسكي

Minkowskian geometry أصعبُ استيعاباً من هندسة المكان وحده. ومع ذلك، فإن الملاحظات التالية ستزوّدك بانطباعٍ عن بعض سماتها واختلافها عن المكان نفسه. المادة التي سنسردها ليست أساسية لفهم ما نورده لاحقاً، لذا فإنْ بدا لك أنها مربكةٌ إلى حدٍّ ما، فلا تقلقْ، وتابع مسيرتَكَ. ولتكوين ثقتك بالتفكير في هذا النوع من الأشياء، فإنني سأستعمل نفس الأداة التي استعملتها سابقاً: فكما وجدنا أن بوسعنا الحصول على فكرة غامضة عن الفضاء الرباعي الأبعاد عن طريق الزيادة التدريجية لعدد الأبعاد، فمن الممكن هنا أيضاً التقدّم تدريجيًّا نحو فهم الزمكان الرباعي الأبعاد، وذلك بالبدء بعددٍ صغير من الأبعاد.

لا وجود لشيءٍ مثل الزمكان الصفريّ البعد أو الأحادي البعد. الفرق بين المكان والزمكان (كما يعبَّر عنهما بالبصمة المترية) مهمٌّ فقط عندما يكون لدينا زمكان ثنائي البعد (زمكانٌ ـ 2)، بعدٌ للمكان، وآخر للزمان. يضاف إلى ذلك أن الزمكان ـ 2 يمكن تمثيله برسمٍ منبسطٍ، فيه محور يدلّ على المكان، وآخر يدلّ على الزمان (الشكل 9-5). وتبيّن الخطوطُ في الشكل مساراتٍ مختلفةً للجسيم عبر العالَم، وهي التي أسماها منكوفسكي خطوط العالَم worldlines. كلُّ خطِّ عالَمٍ رأسيٍّ هو تاريخُ جسيمٍ مستقر: أي أن الجسيم يقبع في نفس النقطة من المكان مع تقدّم الزمن. وكل خطّ عالَمٍ يميل قليلاً نحو اليمين يقابل جسيماً يتحرك ببطء نحو اليمين، لأن موقع الجسيم يتحرك يميناً مع تقدّم الزمن. إن خطَّ عالَمٍ يميل بزاويةٍ قدرها 45 يقابل جسيماً يتحرك يميناً بسرعة الضوء ويقطع متراً من المسافة في متر واحد من زمن رحلة الضوء (30 جزءاً من التريليون من الثانية بالوحدات التقليدية). ويمثل هذا الخطُّ أسرعَ حركةٍ ممكنةٍ للجسيم، لأنه لا وجود لشيءٍ بوسعه الحركةُ بسرعةٍ تفوق سرعةَ الضوء، ولا يمكن أن تبلغَ هذه السرعةَ إلاّ الجسيمات التي لا كتلة لها (مثل الفوتونات). وكلّ خطوطِ العالَمِ الممكنةِ تقع بين الخط الأيسر المائل بزاوية 45 (جسيم يتحرك يساراً بسرعة الضوء)، والخط الأيمن المائل بزاوية 45 (جسيم يتحرك يميناً بسرعة الضوء).

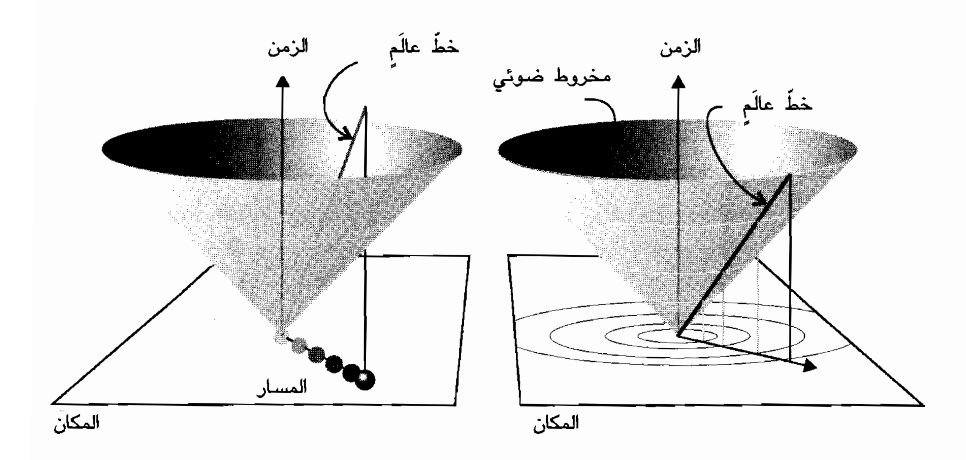
سننتقل الآن إلى الزمكان–3، حيث يوجد بعدان للمكان وواحد للزمان



الشكل **9-5**. خطُّ العالَمِ لجسيمٍ هو، ببساطة، الخط الذي يرسمه مع تقدم الزمن. ويبين المخطط في اليسار جسيماً مستقراً. إنه يظل في مكانه مع تزايد الزمن، لذا فإن خط عالَمِه رأسي. ويبين المخطّط في اليمين نفسَ الجسيم يتحرك بحركة منتظمة نحو اليمين، لذا فإن موقعه يبتعد يميناً مع تقدم الزمن. خطّ عالَمِهِ إذن يميل إلى اليمين. الخطوط التي تميل 45 درجة في المخططيْن هي خط عالم الضوء، الذي يمكنه السير متراً واحداً في كل متر من زمن رحلة الضوء. لا وجود لشيء يسير أسرع من الضوء، لذا فلا وجود لخطٍّ عالَمٍ يميل بأكثر من هذه الزاوية.

(الشكل 9-6)، ويكون الجسيم حرًّا في التحرك في بعدين مكانيّين ـ أينما كان في المستوي ـ مع تقدّم الزمن. وبسبب عدم وجود جسيم يسير أسرع من الصوت، فكل خطوط العالَمِ الممكنة تقع ضمن المخروط الذي نصف زاويته 45 درجة. يسمّى هذا المخروطُ المخروطَ الضوئيّ light-cone للحدث في ذروته، لأن خطوط عالَمِ الضوء، الذي يسير فعلاً بسرعة الضوء، تقع على سطوح تلك المخاريط. ويمكننا تصور نبضة دائرية للضوء تبدأ من نقطة: إنها تنتشر بمرور الزمن كما هو مبيّن بالحلقات على المستوي، وهي معلّمةٌ في الشكل على المخروط الضوئي بأزمان مختلفة.

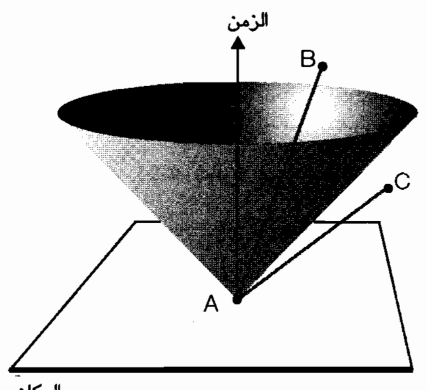
وحالما ننتقل إلى الزمكان–4، علينا التفكير بنوعٍ رباعي الأبعاد من المخاريط تبتدئ من الحدث، حيث تكون الشرائحُ عبر المخروط في أي لحظة كرةً ثلاثيةَ الأبعاد (تمثل انتشارَ نبضةٍ كرويةٍ من الإشعاع). أن أجعلكَ تتصوّرُ هذا، فشيءٌ خارجَ حدودِ إمكاناتي كليًّا، ولن أدّعي معرفة طريقةً أمثِّلُ بها تلك الكرةَ على الورق. ولحسن الحظ، فإن شكل المخروط الضوئي للنبضات في بعدين مكانييّنْ في الشكل 9 هو كل ما نحن بحاجةٍ حقًّا إلى فهمه.



الشكل 9-6. في الفضاء الثنائي البعد، الذي يمكن فيه أن يتحرك جسيم بحريّة على مستوٍ، يقع خط العالَم في مكانٍ ما داخل المخروط المبيَّن في الشكل الأيسر. المخروط نفسه هو المخروط الضوئي، وهو خطوط عالَم نبضةِ ضوءٍ تبدأ من المنبع. لا وجود لخطوط عالَمٍ واقعةٍ خارج المخروط، لأن هذا يوافق حركةً أسرعَ من الضوء.

يقسّمُ المخروطُ الضوئيُّ الأحداثَ إلى صنفيْن. لننظر، مثلاً، في الحدثين A وَ B في الشكل 9-7. لمّا كان B يقع ضمن المخروط الضوئي الذي رأسه A، فمن الممكن للإشارات الذاهبة من A الوصول إلى B بعد زمن معيّن للتأثير في B. والآن، لننظر في الحدثيْن A وَ C. لا يمكن للحدث في A التأثير في الحدث في C، لأن C نقطة واقعة خارج المخروط الضوئي الذي رأسه في A، لذا لا يمكن لإشارةٍ من A الوصولُ إلى C للتأثير فيه. ونقول إن A وَ B (وجميع النقاط الأخرى الواقعة ضمن المخروط الضوئي وعليه) يرتبط بعضها ببعض سببيًّا causally related، في حين لا تكون A وَ C (وجميع النقاط الأخرى الواقعة خارج المخروط الضوئي) كذلك. لقد سبق وذكرنا أن السببيّةَ هي قوامُ حياةِ العلْم، لذا فإن حقيقةَ كون المخروط الضوئيّ يقسّم الزمكان إلى منطقتيْن من الأحداث مرتبطٌ أو غيرُ مرتبطٍ بعضُها ببعضٍ سببيًّا حقيقةٌ بالغة الأهمية في فهمنا للعالَم. وعلى سبيل المثال، فأيًّا كان الحدثُ الذي جرى في A، كأنْ يكونَ

الشكل 9-7. يقسم المخروطُ الضوئيُّ



الأحداثَ إلى أحداثٍ يرتبط بعضها ببعض سببيًّا، وأحداثٍ ليست كذلك. فإذا جرى حادث في A، فيمكن أن يؤثر في أحداثٍ ضمن المخروط الضوئي، مثل الحدث B، لكنْ ليس بوسْعه التأثيرُ في الأحداثِ الواقعة خارج المخروط الضوئيّ، مثل الحدث C لأنه لا يمكن لإشارةِ الارتحالُ من A إلى C.

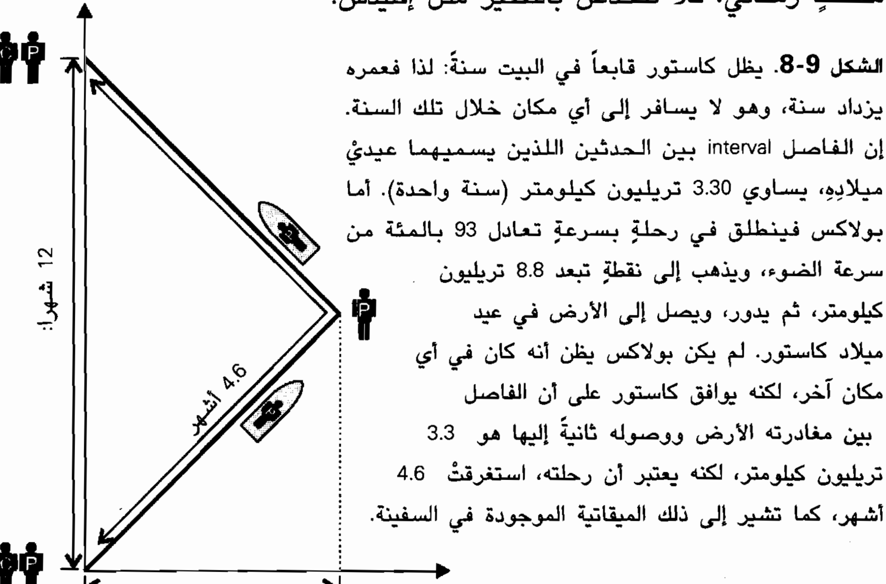
تدميرَ الأرض بعد ظهر يوم الأحد الماضي، فلا يمكن أن يكون له أي تأثير في الحدث في C، الذي قد يكون محاضرة في التاريخ الكونيّ ستُلقَى يوم الاثنين القادم على كوكب نجم بعيد جداً عن الأرض.

●

قد يبدو ما سبق مألوفاً إلى حدٍّ ما، لأن الخطوطَ والمخاريطَ التي رسمناها تُرَدِّدُ صدى خاصيات الفضاء العاديّ. وسنتطرّق الآن إلى الفرق الرئيسي بين الفضاء الإقليدي وزمكان منكوفسكي، وإلى السِّمة التي يستحيل فهمها بشكلٍ حدْسي. في الفضاء، الخطّ المستقيم هو أقصرُ مسافةٍ بين نقطتيْن. وفي الزمكان، الذي له هندسةٌ طريفةٌ، هي هندسة منكوفسكي، يتعيّن علينا تعوّدُ فكرةِ أنّ الخطّ المستقيمَ يوافق أطول فاصلٍ بين حدثين. والحكاية التالية عن الأخويْن كاستور وبولاكس Castor and Pollax تساعد على شرح هذه النقطة.

لنتصور أن كاستور يبقى في البيت. إن خطّ عالَمِهِ رأسيٌّ ويمتدّ من عيد ميلاده العشرين إلى عيد ميلاده الواحد والعشرين. بولاكس يحتفل بعيد ميلاده العشرين مع أخيه كاستور، وينطلق مباشرة في رحلةٍ، يرى كاستور أنها ستدوم 12 شهراً يُسافر خلالها بسرعةِ 1 000 000 000 كم/سا متجهاً إلى فضاءٍ بين نجَمِيٍّ interstellar، ثم يعود إلى الأرض، التي يصل إليها في عيد ميلاد كاستور

الواحد والعشرين. وفيما يتعلق بكاستور، فإن بولاكس قطع 8.8 تريليون كيلومتر. يستعمل كاستور الزمن الذي كان أخوه فيه غائباً، ويحسب الفاصل بين بداية ونهاية رحلة أخيه فيجد 3.30 تريليون كيلومتر. يوافق بولاكس على ذلك، لأن الفاصل لا متغيّر. لكنه نظراً إلى أنه لم يخرج من السفينة الفضائية التي كانت نوافذها مغطاةً بالستائر، فإن بولاكس يعتبر أنه لم يكن في أي مكان آخر، لذا فإنه يعزو الفاصل interval إلى مرور الزمن، لا إلى تغير الموقع في الفضاء. وبالوَحدات التقليدية، 3.30 تريليون كيلومتر من زمن رحلة الضوء يُقابل 4.6 شهر (الشكل 9-8). ونحن نرى أن خطّ العالَم الذي يمثل الرحلة التي قام بها بولاكس بين الحدثيْن اللذين يميزان عيدي ميلاد كاستور يقابل فاصلاً أقصر من الخط المستقيم بين عيدي الميلاد (الذي يقابل خطّ عالم كاستور)، حتى لو بدا الخطُّ الذي ترسمه الرحلة أطولَ في عيوننا الإقليدية. وتسوّغ هذه النتيجةُ كونَ ملاحظتنا أن الخطوط المستقيمة بين الأحداث تقابل فواصلَ أطولَ (وفي الحقيقة أطولَ فواصلٍ) من المسارات غير المباشرة. هذا صحيح عموماً. فعندما تنظرُ إلى مخطّطٍ زمكانيٍّ، فلا تنخدعنّ بالتفكير مثل إقليدس.



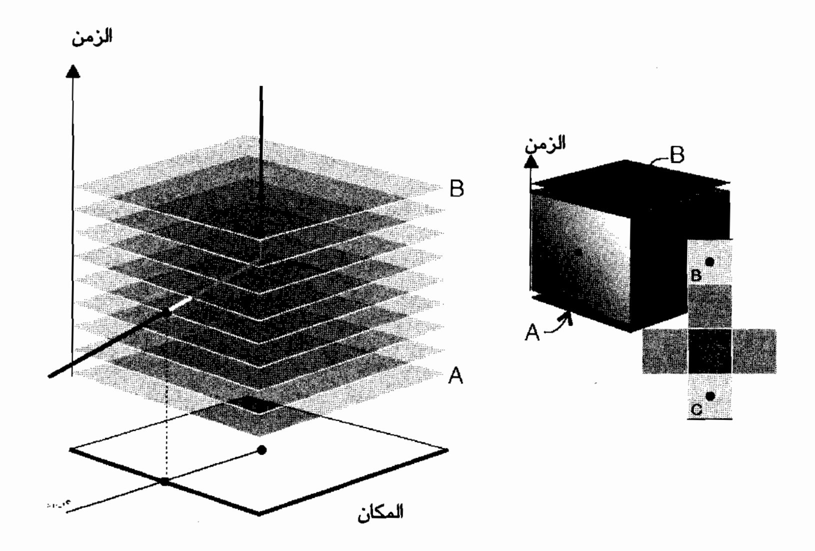
الشكل 9-8. يظل كاستور قابعاً في البيت سنةً: لذا فعمره يزداد سنة، وهو لا يسافر إلى أي مكان خلال تلك السنة. إن الفاصل interval بين الحدثين اللذين يسميهما عيديْ ميلادِهِ، يساوي 3.30 تريليون كيلومتر (سنة واحدة). أما بولاكس فينطلق في رحلةٍ بسرعةٍ تعادل 93 بالمئة من سرعة الضوء، ويذهب إلى نقطةٍ تبعد 8.8 تريليون كيلومتر، ثم يدور، ويصل إلى الأرض في عيد ميلاد كاستور. لم يكن بولاكس يظن أنه كان في أي مكان آخر، لكنه يوافق كاستور على أن الفاصل بين مغادرته الأرض ووصوله ثانيةً إليها هو 3.3 تريليون كيلومتر، لكنه يعتبر أن رحلته، استغرقتْ 4.6 أشهر، كما تشير إلى ذلك الميقاتية الموجودة في السفينة.

النقطة التالية التي يجب ملاحظتها هي أن بولاكس كَبُرَ عمرُهُ أقل من كِبَرِ عُمُر كاستور. إن بولاكس، الذي بقي استقلابه منسجماً مع مرور الزمن في سفينته، لم يكبر سنّه إلاّ 4.6 أشهر، في حين كبر سن كاستور سنة[9]، لذا، فكي نتفادى الشيخوخة، علينا السفر بسرعةٍ أعلى.

ثمة سمةٌ أخرى تميّز الزمكان من الفضاء هي أهمية الحجم. ففي مرحلةٍ ما، لن نكونَ قادرين على تفادي تَصَوُّرِ الإبعادِ الأربعةِ، لكنْ يمكننا التوصّل إلى تلك المرحلة بالتفكير في عددٍ أصغر من الأبعاد، ثم تقديم الحجج باستعمال القياس (التشبيه) analogy. لنأخذْ صندوقاً مكعّباً في زمكانٍ ثلاثيِّ الأبعاد، بُعْدَانِ للمكان، وثالثٌ للزمان. وكما هو الحال في صندوق مكعّبٍ عاديٍّ في فضاءٍ ثلاثيّ الأبعاد، فلهذا المكعّب ستة وجوهٍ مربعة (الشكل 9-9). إن الوجه الذي عُلِّمَ بالحرف A في الشكل يقع كلّيًا في بُعدي الفضاء، ويوافق مستوياً مكانيًا عاديًا في لحظةٍ معطاةٍ. فكّرْ فيه بأنّه ملاءةٌ منبسطةٌ من الورق في لحظةٍ معيّنةٍ. والوجه المعلَّم بالحرف B هو نفس المستوي في وقتٍ لاحقٍ: فكِّرْ فيه بأنه نفسُ ملاءةِ الورقِ بعد خمس دقائق، وأنه يقع في نفس المكان. الوجه المعلَّم بالحرف C مكوَّنٌ من خطوطِ عَالَمٍ رأسيّةٍ لجميع النقاطِ على حرفٍ من ملاءة الورق الساكنة (حرف واحد من الوجه A)؛ وبالمثل، فكلٌّ من الوجوهِ الرأسيّة الأخرى مؤلَّفٌ من خطوطِ عوالِمَ رأسيةٍ لنقاطِ كلٍّ من الأحرف الثلاثة الأخرى لملاءة الورق.

تلخّص الوجوه الرأسيّةُ الأربعةُ جميعَ الأحداث التي تجري على كلٍّ من حروف ملاءة الورق خلال الدقائق الخمس التي ذكرناها آنفاً. فمثلاً، لنفترض أن نملة تَدُبُّ على ورقةٍ من اليسار بعد دقيقتين. في البداية، تكون ملاءة الورق

(9) إن مصطلح «محيّرة التوأم» twin paradox، التي تُعزَى إلى هذا الوصف، تنطلق من عجز بعض الناس عن رؤية أنّ لبولاكس تاريخاً يختلف عن تاريخ كاستور. لقد بسّطتُ الشرحَ بأن تجاهلْتُ أثر التباطؤ deceleration والتسارع الذي يعقبه عندما يدورُ بولاكس ليتجه بسفينته نحو الأرض التي انطلق منها. وعندما نُدْخِلُ كلَّ هذه الآثار في الحسبان، فإن النتائج تبقى على حالها دون تغيير.



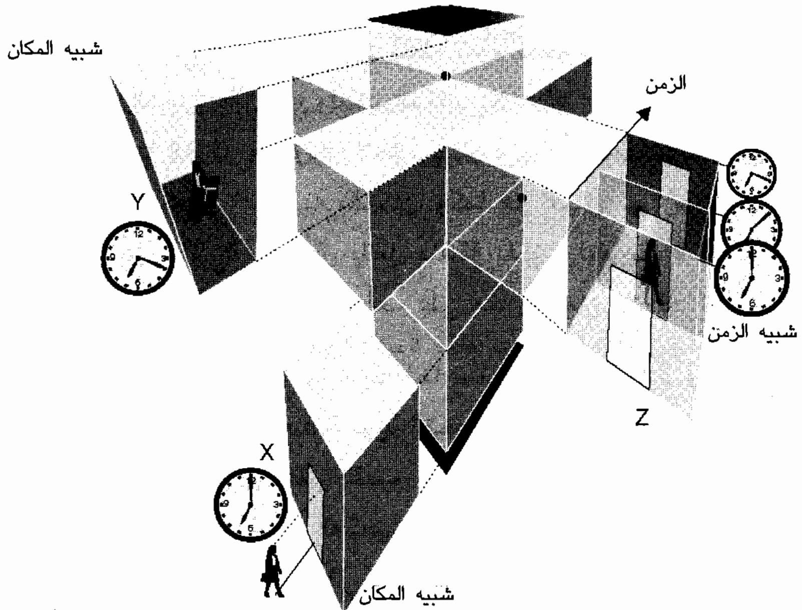
الشكل 9-9. نملة تمشي على مهلٍ على ملاءةٍ ورقيّةٍ مستطيلةِ الشكل، ثمّ تتوقّف في وسطها. الوجه السفليّ للمكعب ـ 3 (A) فارغ في البدء، لأن النملة ليست موجودة على الملاءة، لكنْ عندما نتفحص الملاءة في وقت لاحق، نجد النملة هناك، ونشير إلى موقعها بنقطة على المستوي الموافق (B)، وهو الوجه العلوي من المكعب ـ 3. وفي لحظةٍ ما، لا بد أن تكون النملةُ اجتازت الحرف الأيسر من الملاءة، ونحن نعلِّمَ ذلكَ الموقعَ بنقطةٍ تبدو على الوجه الموافق للمكعَّب ـ 3 (C).

فارغةً، لذا يكون المستوي خالياً أيضاً. تدبّ النملة من اليسار وترسم خطَّ عالَمِهَا. إنها تتجاوز الحرف الأيسر، لذا نرى أن نقطة تظهر هناك. لنفترض بعد ذلك أن النملة تتوقّف عن دبيبها في وسط الملاءة وتبقى هناك. إن خطّ عالمها الآن رأسيٌّ، وبعد ثلاث دقائق أخرى، تظهر نقطة على الوجه B. لاحظ أن الفرق بين المستويين A (لا نقط عليه) وَB (نقطة واحدة) يُقَابَلُ بنقطةٍ في مكانٍ ما على أحد المستويات الرأسيّة (في هذه الحالة، على C). وإذا اشترطنا أنه لا يمكن لجسيمٍ أن يوجد من لا شيء، فالفرق بين المستويَيْن الأفقيّيْن «الشبيهيْن بالمكان» space-like A و B. يجب أن يقابَلَ بحدثٍ على واحدٍ من المستويات الرأسية «الشبيهة بالزمان» time-like (وهو C لهذه النملة).

سنثبّتُ الآن أحزمتَنَا العقليَّة، وَنُقْلِعْ إلى الزمكان الرباعي الأبعاد. وهاكَ ما يتعيّن

عليك عمله لتشعر بالراحة: تمسّكْ بحقيقة أن الأبعاد الأربعة شبيهة تماماً بالأبعاد الثلاثة، لكنّ المستوياتِ المكانيةَ (ملاءات الورق) يُستعاض عنها بحجومٍ مكانيّةٍ (غرفٍ)، ويُستعاض عن النمل الذي يدبّ على الورق بأشخاصٍ يدخلون الغرف.

كما سبق ورأينا، فإن جدرانَ مكعّبٍ-4 مكوّنةٌ من ثمانيةِ مكعّباتٍ - 3 (عُدْ إلى الشكل 9-4). وفي الزّمكان، فإن اثنيْن من هذه المكعبات-3، اللذين سنرمز إليهما بالحرفين X وَ Y، هما مكانيّان تماماً، ويوافقان مناطق ثلاثية الأبعاد من المكان - غرفاً حقيقية - في الزّمنيْن الابتدائيِّ والنهائيِّ (الشكل 9-10، حيث



الشكل **9-10.** يبيّن مكعّبٌ ـ 4 تاريخَ شَغْلِ منطقةٍ ثلاثية الأبعاد (غرفة) تماماً مثلما يمثّل مكعّبٌ ـ 3 تاريخ وجود نملةٍ على ملاءة ورقٍ ثنائية البعد. المكعب ـ 3، أي X، هو الغرفة الفارغة الأصليّة عند الساعة 7.00 مساءً. وبعد عشرين دقيقة، إذا فحصنا الغرفة، الموافقةَ للمكعب ـ 3، أي Y، نجدها مشغولةً، ونعلّم عندئذٍ موقعَ رأسِ من يشغلها بنقطةٍ. وإذا راقبنا في أوقاتٍ متوسطةِ البابَ، فيمكننا إظهار ما يحدث هناك بواسطة متتاليةِ الصّورِ التي تكوّن المكعبَ Z الشبيهَ بالزمان. وبلحظةٍ سريعةٍ عند الساعة 7.10 مساءً يظهر من يشغل الغرفة على المستوي أثناء دخوله الغرفة، لذا نعلّمُ موقعَ رأسه بنقطةٍ في المكعب المقابل. المكعّب المفرط هو سجلٌّ لتاريخ الغرفة بين الزمنيْن الابتدائي والنهائي.

الأحداث التي سأشرحها واردةٌ بتفصيلٍ أوسعَ إلى حد ما)، تماماً مثلما يقابل المستويين A وَ B في الزمكان الثلاثي الأبعاد ملاءةُ الورق الحقيقيةُ في زمنيْن مختلفيْن. ونَصِفُ هذه المكعبات العادية بأنها «شبيهةٌ بالمكان» space-like. تُرى، ما هي أهمية المكعبات-3 الستة الأخرى؟ لكل منها حروف مكوّنة من بعديْن مكانيّيْن وبعدٍ للزمان، لذا فإنها تلخّص تاريخَ ما يحدث في كلّ وجه ثنائي البعد للصندوق الحقيقي، تماماً مثلما لخَّص C ما حدث في حافة ملاءة الورق.

نصف هذه المكعبات بأنها «شبيهة بالزمان» time-like. ولرؤية أهميتها، سنفترض أن مكعّبنا الشبيهَ بالمكان يمثل الغرفة التي أنت فيها الآن. وقبل أن تدخلَ الغرفةَ، كانت فارغة، لذا فإن المكعب الشبيه بالمكان X فارغ. وعندما دخلتَ الغرفةَ، اجتزْتَ باباً في الجدار، لذا فإن نقطةً تعلِّم نقطةَ وزمنَ دخولك تظهرُ في المكعب المقابل الشبيه بالزمان، وليكن المكعب X، مثلاً (قد تمثل النقطةُ موقعَ أنفك). وإذا فحصنا الغرفةَ في وقت لاحق، خلال وجودكَ فيها، سنجد أن موقعك معلَّمٌ بنقطةٍ في المكعب Y الشبيه بالمكان. وكما هو الحال في زمكانٍ ـ 3، فأيُّ فرقٍ بين المكعبيْن X وَ Y يجب أن يقابَلَ بنقطةٍ داخل واحدٍ من المكعبات الستة الأخرى: أمّا موقع النقطة الأخيرة فيتوقَّف على مكان وزمان دخولك الغرفة.

لتلخيص هذه المناقشة وإعدادك لما سنورده لاحقاً، أودّ أن أحثّكَ على التفكير بعموميةٍ أعلى قليلاً. فعندما تريدُ التحدثَ عن الطاقة أو الكتلة في منطقةٍ من الفضاء، فسنكون قادرين على تقديم هذه الصورة. الطاقة الكلية (أو الكتلةُ الواردة في العلاقة $E=mc^2$) في المكعب X ستكون الطاقة الكليّةَ في منطقةٍ من الفضاء في البداية، والطاقة الكلّية في المكعب Y ستكون الطاقةَ في تلك المنطقة بعد أن يكونَ مرَّ وقتٌ معطًى. والطاقةُ الكليةُ في المكّعبات الشبيهةِ بالزمان ستمثل تدفّقَ الطاقةِ إلى، أوْ مِنْ، المنطقةِ خلال جدرانها الحدوديّةِ، ويجب أن يكونَ التدفقُ الصافي للطاقةِ مسؤولاً عن الفرق بين كميةِ الطاقةِ في المكعّبين الشبيهيْن بالمكان X وَ Y.

ربما كان ما أوردناه حتى الآن عن المكعباتِ الزمكانية المفرطة كافياً. وآمل أن تكونَ بدأتَ باستيعاب بنية الزمكان وأهمية النقاط والحجوم فيه. وقبل أن نخطو الخطوة التالية معاً أودّ أن أُطْلِعَكَ على سمةٍ أخرى للنسبيّة الخاصة. وستكشف لك هذه الخطوة الهامة النقابَ عن أصل أشهر عبارةٍ في الفيزياء كلها، وهي $E=mc^2$، أو الطاقة = الكتلة × c^2، ثم إنّ هذه الخطوة ستبيّن لنا أن هذه العبارة المهمة فكريًّا واقتصاديًّا وتجاريًّا وعسكريًّا وسياسيًّا، هي سمةٌ أخرى لهندسة الزمكان. وفي الوحدات التي يعبَّر بها عن الزمن بصفته طولاً، يكون $c=1$، لأن الضوء يقطع متراً واحداً في متر من زمن رحلة الضوء، وعندئذٍ تتخذ معادلة آينشتاين صيغةً أقل أُلفةً، لكنها أبسط كثيراً، وهي "الطاقة = الكتلة". وبعبارةٍ أخرى، لا فرق بين الطاقة والكتلة.

لا مناص لي من استعمالِ قَدْرٍ ضئيل من الرياضيات، لكنْ سيكون لهذا الاستعمالِ نتائجُ مثيرةٌ. نحن نعرف أن العلاقة بين الفاصل interval والزمن والمسافة هي:

$$(\text{الفاصل})^2 = (\text{الزمن})^2 - (\text{المسافة})^2$$

من السهل إعادة ترتيب هذه العلاقة بتقسيم كلا الطرفين على مربع الفاصل، فنجد:

$$1 = \frac{(\text{الزمن})^2}{(\text{الفاصل})^2} - \frac{(\text{المسافة})^2}{(\text{الفاصل})^2}$$

بعد ذلك، لنضرب كلا الطرفين بمربع الكتلة، حيث الكتلة هي كتلة أي جسيم نفكر فيه (ذرة يورانيوم، ضفدع، كوكب المشتري). عندئذٍ نجد أن:

الزمن

المسافة

$$(\text{الكتلة})^2 = \left[\text{الكتلة} \times \frac{(\text{الزمن})}{(\text{الفاصل})}\right]^2 - \left[\text{الكتلة} \times \frac{(\text{المسافة})}{(\text{الفاصل})}\right]^2$$

وبسبب كون المسافة/الفاصل مشابهة لعبارة السرعة العادية، وكون حاصل ضرب الكتلة في السرعة مساوياً تعريفاً الاندفاعَ الخطّيّ (الفصل 3)، فبإمكاننا توقُّعُ أن يكون الحدُّ الأيسرُ في الطرف الأيسر من المساواةِ السابقةِ هو العبارةَ النِّسْبَوِيَّةَ relativistic لمربّع الاندفاع. لن أدخل في التفصيلات، لكنّ هذا التوقع مؤيَّد بالتفكير في تصادم جسيمين، والتوصل إلى أن القيمة الكليّة للعبارة "الكتلة × المسافة/الفاصل" تبقى دون تغيير بالتصادم. إن أحدَ المعتقداتِ المركزيةَ للفيزياءِ، كما رأينا في الفصل 3، هو «انحفاظ الاندفاع الخطّيّ»، وهو مبدأٌ يَعني أنه برغم إمكان حدوث جميع الأشكال من الأحداث المعقّدة عند تصادم جسميْن، فإن الاندفاع الكلّيّ يبقى على حاله دون تغيير.

لكنْ ما هو الحدّ الأول في اليسار؟ إذا صِغْنَا معادلاتِ التصادمِ بين جسيمين فإننا نجد أن الكمية "الكتلة × الزمن/الفاصل" تظل أيضاً دون تغيير في التصادم حتى لو حدث قدر كبير من الأحداث الفردية المعقدة. ثمة مبدأٌ عظيمٌ آخر للفيزياء، كما رأينا في الفصل 3، هو أن الطاقة منحفظة. وتوحي هذه الملاحظة بقوة أنه يجب المطابقة بين الكتلة × الزمن/الفاصل والطاقة، وأنه يجب كتابة المعادلة الأخيرة بالصيغة:

$$(\text{الكتلة})^2 = (\text{الطاقة})^2 - (\text{الاندفاع})^2$$

إن المطابقة بين "الكتلة × الزمن/الفاصل" والطاقة مُسَوَّغٌ أيضاً بإثباتِ أنها، كما هو الحال في الاندفاع، منحفظةٌ أيضاً في التصادم. وأحد اقتضاءات هذه العبارة، التي تشبه عبارة الفاصل، هو أنه مثلما يجب التفكير بأن المكان والزمان موحَّدان في الزمكان، فإن الاندفاعَ الذاتيّ والطاقةَ يجب التفكير فيهما بأنهما وجهان لاتحادٍ يُمكن أن يطلَق عليه - لكنْ نادراً ما يحدث ذلك - اسمٌ غليظٌ هو طاقة الاندفاع momentum energy. إن الكتلةَ، التي تُحسبُ وفقاً لهذه المعادلة من الطاقة والاندفاع مثلما يُحسبُ الفاصلُ من الزمن والمسافة، لا متغيرةٌ،

وهذه خاصيّةٌ وُجِد أنها لا تتغيّر بالنسبة إلى جميع الراصدين، أياً كانت السرعة التي يتحركون بها[10].

يمكننا الآن الانتقال بسرعة إلى نتيجتنا النهائية. لنفترض أن الجسيمَ مستقرٌّ في إطارنا العطاليّ - الذي قد يكون تكتلاً من الحديد. لما كان الجسيمُ مستقراً، فاندفاعه صفريٌّ، لذا فإن المساواة (الكتلة)^2= (الطاقة)^2− (الاندفاع)^2 تصبح (الكتلة)^2 = (الطاقة)^2، وعندئذ يمكننا الاستنتاج مباشرة أن الكتلة = الطاقة، وهذا ما أردنا اشتقاقه. ويتعيّن عليكَ ملاحظةُ كيف أنْ هذه العبارةَ الاستثنائيةَ هي نتيجةٌ مباشرةٌ لهندسة الزمكانِ المتّحدةِ مع اثنين من قوانين الانحفاظ في الفيزياء، اللذين سمحا لنا بالوصول إلى هذه النتيجة[11].

لقد قادتنا دراستُنا لهندسة الزمكان إلى اعتبار الكتلة والطاقة متكافئتيْن. وعلينا الاستنتاجُ أنه إذا اختفت الطاقة من منطقةٍ، فإن كتلة تلك المنطقة تنقص. وإذا تدفّقت الطاقةُ إلى منطقةٍ، فإن كتلة المنطقة تزداد. ومن الوجهة العمليّة، فإن الفرق في الكتلة يمكن إهماله كلّياً في الأجسام العادية. فمثلاً، الفرق بين كتلتي قديفة مدفعٍ كتلتها 10 كيلوغرام عندما تكون في درجة حرارة الغرفة ثم في درجة الحرارة 1000 كلفن ليست سوى 50 بيكوغرام (50 جزء من مليون مليون غرام)، وهذا فرقٌ لا يمكن كشفه بتاتاً (بالتقانة الحاليّة)[12]. إن التغيراتِ في الطاقةِ التي ترافِقُ إعادة ترتيباتِ الجسيماتِ دون الذرية subatomic، وهي البروتونات والنيوترونات، التي تكوِّن النُّوى الذرية، أكبرُ كثيراً من تلك التي

(10) في العروض القديمة للنسبية الخاصة، كانت المادة تُقَدَّم بصفتها كميةً تتزايد مع السرعةِ. هذه نظرة من طراز عتيق، إذ إن المادة تعتبَر حالياً لا متغيراً.

(11) رأينا في الفصل 6 أن قانوني الانحفاظ هذين هما أيضاً سمتان لتناظر الزمكان، لذا فإن القوة النووية ليست سوى تعبيرٍ عن فعالية الهندسة. وقد استشعر جوزف كونراد J.Conrad في قصة العميل السرّيّ The Secret Agent - التي تصف الفوضويون فيها مرصداً بالقنابل، أن في ذلك اعتداءً على التجريد الهندسي.

(12) ومع ذلك. فعندما يعبَّر عنه بعددِ ذرات الحديد، فإنه يكافىء إضافة 540 بليون ذرّةِ حديدٍ إلى القذيفة.

نحصل عليها من مجرّد تسخين القذائف المدفعية. الانشطار النوويّ nuclear fission هو عمليةٌ تنقسم فيها نواةُ ذرةٍ إلى نواتيْن صغيرتيْن، وهذا يسمح للبروتونات والنيوترونات في النواة أن تستقرّ في ترتيباتٍ أكثر ملاءمة طاقيًّا، ومن ثَمَّ تحرّد الطاقة الزائدة. وعندما يخضع 10 كيلوغرامات من اليورانيوم 235 إلى الانشطار، فإن الطاقةُ المحرّرةَ تقابلُ خسارةَ كتلةٍ قدرها 10 غرامات، وهذا يُكافىء الطاقةَ المحرّرةَ نتيجةَ حَرْقِ 30 ألف طنٍّ من الفحم. وهكذا فالهندسة فعّالةٌ بدرجةٍ مذهلةٍ.

●

لقد نشأ قسم كبير ممّا أوردناه في هذا الفصل حتى الآن من إلغاء ثابتٍ أساسيٍّ، هو سرعة الضوء، ومن بساطة العبارات الناتجة. سننتقل الآن إلى إلغاء ثابتٍ أساسيٍّ آخر، وبذلك نتوصّل إلى فهمٍ أعمقَ للطبيعةِ (رأينا هذه العملية في الفصل 3، حين حذفنا المكافىءَ الميكانيكيَّ للحرارة، وكُوفئنا نتيجةَ ذلكَ بنظرةٍ أعمقَ إلى الترموديناميك). وأنا أشكّ في أنه إذا تعيّن علينا حذفُ جميعِ الثوابتِ الأساسيّةِ، فنحن سنفهمُ الطبيعةَ تماماً! والآن، نرى من المناسب الانتقال إلى الفكرة العظيمة التي هي القلب الحقيقيّ لهذا الفصل. وقد أنفق آينشتاين قرابة عقدٍ للانتقال من النسبية الخاصة إلى نظريةٍ أعمّ، تسمّى عموماً النسبية العامة general relativity، أو نظرية آينشتاين في الجاذبية Einstein's theory of gravitation، أو بكلّ بساطةٍ «نظرية آينشتاين».

إن نظرية نيوتن في الجاذبية، التي اعتبرها هو قوةً فاعلةً في الفضاء الخالي، تتميّز بثابتٍ أساسيٍّ عالميّ، هو الثابت التثاقلي[13] أو الجاذبي. ووفقاً لنيوتن، فإن قوة ثقالة (جاذبية) جسمٍ تتناسب مع حاصل ضرب G في كتلة الجسم. ويعني التناسب أنه عندما تكون المسافتان بين جسمٍ ومركزي الشمس والأرض متساويتيْن، فإن قوة ثقالة (جاذبية) الشمس، التي كتلتها 336 ألف مرة

(13) القيمة المقبولة حالياً لِـ G هي 6.673×10^{-11} م^{3} كغم$^{-1}$ ثا$^{-2}$.

من كتلة الأرض، تكون أكبر 336 ألف مرة من قوة ثقالة (جاذبية) الأرض.

لنقم أولاً ببعض الإجراءات الابتدائية. ومن الآن فصاعداً، سنُدْخِلُ G ضمن كتلة الجسم، وبذلك نعبّر عن الكتلة بطولٍ[14]، وبالتعبير باستعمال الطول فإن كتلَة الأرض هي 4.41 مليمتر، وكتلةَ الشمس أكبر بـ 336 ألف مرّة، أي أنها 1.48 كيلومتر. ويجب أن تلاحِظَ أننا عبّرنا الآن عن الكتلةِ والطولِ والزمنِ جميعاً بوحداتِ الطولِ؛ وكان بمقدورنا التعبيرُ عنها جميعاً بوحداتِ الزمن، وذلك بالتقسيم على c، لكن الأعدادَ الحاصلة ستكون بشعة وستحظى بأهمية مباشرة أقل[15]. وعليك أن تلاحظ أيضاً أننا حذفنا الثابت الغامض G من وصف نيوتن للثقالة (للجاذبية)، وهذا يوحي بأن الثقالة (جاذبية) هي، بمعنًى ما، مفهوم مصطَنَعٌ، وأن G تظهر في الفيزياء لا لأن لها أي أهمية أساسية كبيرة، بل لأن أسلافنا اعتمدوا وحدةً غريبةً (مثلاً، الكيلوغرامات) للتعبير عن الكتلة بدلاً من الوحدة الطبيعية، وهي الطول (كالمتر، مثلاً). لكن أعمق ملاحظة يمكنني إيرادها في هذا السياق، والتي يجب ألاّ تغيب عن بالكَ خلال عرضي للأفكار، هي أنه بالتعبير عن جميع الكميات بدلالة الطول، فإننا ننتقل نحو وصفٍ يصبح فيه تأثير الكتلة في الزمكان فرعاً من الهندسة الإقليدية. وربّما كان من الممكن أن يصاب إقليدس بالافتتان لو عرف مدى اعتباراته.

سنشمّر عن سواعدنا للعمل. لقد نشأت النسبيّةُ العامّةُ من مصادفة مشهورة حدثت مع آينشتاين. المصادفات المشهورة في العلم، كما في الحياة العادية، محاطةٌ دوماً بالشبهات. وفي الحياة العادية، تتجه عموماً نحو الخداع؛ أما في العلم، فتتجه عموماً نحو الإلهام. والمصادفة التي نحن بصددها هي أنه جرت العادة على استعمال الكتلة للتعبير عن مقاومة جسمٍ لقوةٍ - وهذا ما أسميناه في الفصل 3 «الكتلة العطالية» للجسم - وذلك مثلما استُعملت الكتلة للتعبير عن

(14) على وجه التحديد، نستعيض عن بالمقدار Gm/c^2.

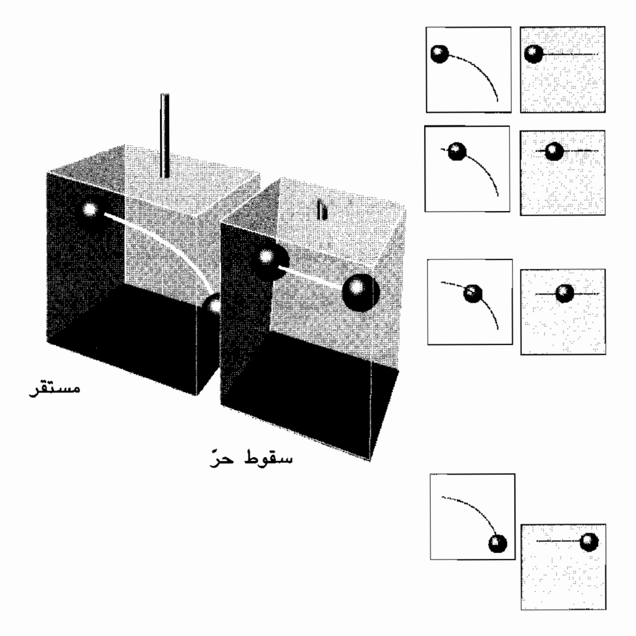
(15) لا نورد الثقوب السوداء في هذه المناقشة. أما إذا فعلنا ذلك، وجدنا أنّ نصف قطر أفق الحدث حول ثقب أسود كتلته ، وهو نصف قطر حدود الثقب التي لا مهرب من تأثير الثقب داخلها، يساوي مترين (بوحدات الطول). إن أفق ثقب أسود كتلته تساوي كتلة الأرض يقع على مسافة 8.8 مليمتر من مركزه.

قدرة الجسم على توليد جذب تثاقلي، وهذا ما يسمى «الكتلة التثاقلية» للجسم. وقد جرى التثبُّتُ من هذا التكافؤ تجريبيًّا بدقة تساوي واحداً في التريليون تقريباً، وهذا يوحي بقوة أن الكتلةَ العطاليّةَ والكتلَةَ التثاقليّة هما شيءٌ واحدٌ بالضبط. لا بدّ أنك سترى في هذا شيئاً غريباً، فلا وجود لسببٍ ظاهر مباشرةً يفسّر أن مقاومةَ قذيفةِ مدفعٍ لركلتي لها يجب أن تكون مطابقةً لقوة الحقل التثاقلي الذي تولّده تلك القذيفة.

استند آينشتاين إلى هذه المصادفة ليحدّد أخرى. لنفترض أنك وأنا موجودان في مصعدٍ متحرك، لكنْ ثمة شيء غير ملائم. فأولاً، نجد أننا محجوزان في الطابق (الدور) 100 من بناية. ولإضاعة الوقت قبل أن يُنْجِدَنَا أحدٌ، نتبادل كرةً أحدنا مع الآخر. وإذا كنا شديدي الملاحظةِ، فإننا نرى أن مسار الكرة مقوّسٌ (الشكل 9-11). ولو كان مصعدنا في أعماق الفضاء، خارج السَّحْبِ الجاذبيّ لأي نجمٍ أو كوكب، فإن مسار الكرة سيكون خطاً مستقيماً. لذا فإننا نعزو التقوّسَ السابق لمسارِ الكرةِ إلى الجاذبية. ولما كنا عالميْن، فقد أجرينا حساباتٍ سريعةً، واكتشفنا أن مسار الكرة قطع مكافىء، وهو الشكل الناتج من قطع مخروط بمستوٍ موازٍ لأحد مولّداته[16].

وفجأةً تحدث المُصيبة. فمنقذونا غير الماهرين والمهمِلين يقطعون كَبْلَ المصعدِ ويحملونه معاً، وهذا يجعل جميع تجهيزات سلامته عاطلة عن العمل. لذا فإننا نسقط نحو الأسفل سقوطاً حرًّا. ولما كنا عالميْن، فإننا نغتنمُ بهدوءٍ الفرصةَ الوحيدةَ المتاحةَ لنا لنسيان قَدَرِنَا، ونواصلُ قذف الكرة من أحدنا إلى الآخر. لكننا نصاب بذهول شديد عندما نرى أن الكرة الآن تسير وفق خطٍّ مستقيم بيننا، كما لو كنا في فضاءٍ تنعدم فيه الجاذبية. لقد ألغى السقوطُ الحرُّ

(16) لفهم القطوع المكافئة جيداً، يمكن الرجوع إلى كتاب أبولونيوس: القطوع المخروطية، لأن اليونانيين درسوا خاصياتها، وذلك قبل وقت طويل من اكتشافنا أن هذه القطوع لا تصف مسارات الكرات فحسب، بل إنها تصف أيضاً شكل الزمكان. هذا وإن القطوع المخروطية تصنَّف إلى قطوع مكافئة، وقطوعٍ زائدةٍ، وقطوعٍ ناقصةٍ. انظر الشكل 10-4.

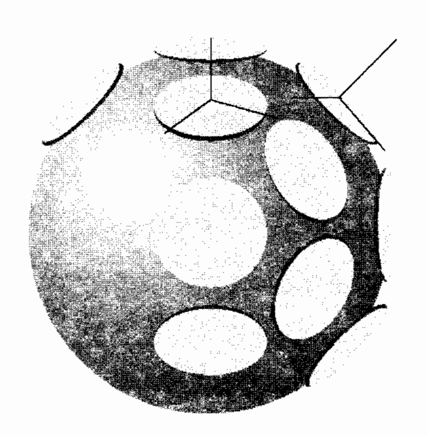


الشكل 9-11. في مصعد مستقر (يساراً)، يكون مسار كرة قذفت أفقياً قطعاً مكافئاً مقوساً نحو الأسفل باتجاه أرضه. وفي الفضاء الحر بعيداً عن أي كتلة تثاقلية، يكون مسار الكرة خطًّا مستقيماً (في الوسط). وفي مصعد يسقط سقوطاً حرًّا، يكون مسارها خطًّا مستقيماً أيضاً (في الوسط). وتبيّن سلاسل الصور في اليمين ما يحدث. فالصناديق البيضاء تبيّن بشيء من المبالغة المسارَ المكافئيَّ للكرة في المصعد الساكن. وتُظْهِرُ الصناديق الرمادية اللون أن المصعد يغيّر موقعه الرأسي بمعدلٍ متسارع، وأن تغير الموقع يلغي سقوط الكرة.

آثارَ الجاذبية! ولو كان مصعدنا على سطح الشمس، لكان المسارُ المكافئيُّ parabolic للكرة ذا تقوسٍ أكثر حدّةً، لكنْ عندما صار المصعدُ يسقط بحرّيّةٍ، فلا بدّ أنْ يكون تسارُعَ بعجلةٍ أشد، وأن تكون الحركةُ قد حوّلتِ القطعَ المكافىءَ إلى خطٍّ مستقيمٍ. الدّرسُ الذي نتعلّمه من هذا هو أنه حيثما كنّا، فبمقدورنا حذفُ آثار الثقالة (الجاذبية) عن طريق اعتلاء منصّة تسقط سقوطاً حرًّا. ولو كان كلُّ شخص سبق له أن عاش طوال عمره في مصعد يسقط بحرّيّة، لما تسنّى لمفهوم الثقالة (الجاذبية) أن يُبْتَكَرَ قطّ.

أثارت هذه الملاحظةُ المدهشةُ انتباهَ آينشتاين واعتمد عليها في بعض القضايا. فاقترح، أوّلاً، أنّ كل الراصدين الذين يوجدون في مصعدٍ يسقط سقوطاً حرًّا سيكتبون نفس كتب الفيزياء التدريسية. هذا هو المحتوى الأساسيُّ لمبدأ التكافؤ principle of equivalence. وبوجه خاصٍّ، فعندما يتجوّل الراصدون في مصاعدهم، لإجراء القياسات وتبادُلِ نتائجهم، فإنّهم سيخضعون لنفس التقلّص في الزمان والمكان الذي تتنبأ به نظريته في النسبيّة الخاصّة. ويمكننا إيراد هذه الدّعوى بمصطلحاتٍ لها طابعٌ هندسيٌّ أوضح هو: إن هندسة الزّمكان تظلّ هي نفسها (وهي هندسة منكوفسكي) في أي مصعدٍ يسقط سقوطاً حرًّا. لذا فكلّ شيءٍ سبق لنا مناقشته فيما يتعلق بالنسبية الخاصّة صحيحٌ في أيّ مصعدٍ يسقط سقوطاً حرًّا.

بيد أنّ الإنجازَ الذي هو أكثر أهميةً لآينشتاين هو التفكيرُ في الكيفية التي ترتبط بها الهندسة في مصعدنا الساقط بمصعدٍ قد يكون ساقطاً بتسارعٍ مغايرٍ. فمثلاً، قد تكون ناطحة سحابك التي تقيم فيها مبنيَّةً على كويكب asteroid، عندئذٍ يجري سقوط مصعدِك بتسارع بطيءٍ جدًّا جدًّا. أمّا ناطحة سحابي فقد تكون على الأرض، عندئذٍ يسقط مصعدي بتسارع نحو عشرة أمتار في الثانية المربعة (لذا تكون سرعة سقوطه بعد ثانيةٍ واحدةٍ 10 أمتار في الثانية، وبعد ثانيتين، تبلغ السرعة 20 متراً في الثانية، وهلم جرًّا). إن هندسة الزمكان «منبسطة» flat - أي أنها هندسة منكوفسكي - في كلٍّ من مصعدينا، لكن رقعتي الصغيرة ذات الهندسة المنبسطة تُلوَى وتدوّر بالنسبة إلى رقعتك. ربما تفكر في محاولة تغطيةِ كرةٍ بقطعٍ من النقود (الشكل 9-12): فكل منطقة صغيرة منبسطة، لكن كل منطقة تَصنعُ زاويةً مع منطقةٍ أخرى. والسؤال الذي عالجه آينشتاين بعد سنوات من التفكير حُلَّ أخيراً، وهو: كيف ترتبطُ مناطقُ الزمكانِ المنبسطِ بعضها ببعض عندما يوجد تكدُّسٌ مادِّيٌّ - نجمٌ، مثلاً - قريباً منها؟ يمكنني وصف زمكاني الموجود على الأرض من وجهة نظر كُوَيْكبَك، ثم أقوم بشرح تأثير ما درج العلماء على تسميته ثقالةً (جاذبية).



الشكل 9-12. الهندسية المحلِّيَّة في أي نقطة من الفضاء إقليديّةٌ (وهي الممثلة بدوائر منبسطة ملحقة بنقاط مختلفة من الكرة). لكنْ في حال جسمٍ ثقيل، كأنْ يكون نجماً أو كوكباً، يكون الفضاء مقوّساً، وتكون منطقةٌ إقليديّةٌ محليّةٌ مفتولةً ومدوّرةً قليلاً بالنسبة إلى أيّ منطقة إقليدية محلية أخرى. وتبيّن نظرية آينشتاين في النسبية العامة كيفية ربط النظم الإحداثية المحلّيّة المختلفة بعضها ببعض.

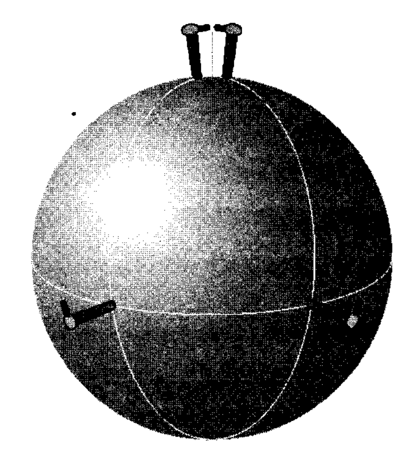
أخذنا سابقاً في هذا الفصل فكرةً عن الزمكان. والآن، يتعيّن علينا قطع خطوةٍ أطول وأعقد تتعلق بحنْي الزمكان spacetime bending، وذلك لاستيعاب الزمكان المقوَّس curved. هذا ليس شيئاً مخيفاً كما قد نظن، لأن من الممكن وضعَ هندسةِ منكوفسكي وراء ظهورنا وتجاوزَ تعقيداتها. وفي الحقيقة، يعدّ كثير من الناس الأفكار الكيفية qualitative للنسبية العامة أسهلَ كثيراً من نظيراتها في النسبية الخاصة لأنهم في النسبية العامة يمكنهم التفكير في فضاء مقوّس (وهذا شيء سهل) بدلاً من تفكيرهم في الزمكان المقوّس (وهو غير سهل). هذا تضليل، لأن موضوع النسبيّة العامة هو الزّمكان المقوّس، لكنه تضليل مقبول، لأنه يجعل المفاهيم سهلة المثال، لذا سنوافق على ذلك.

ومن ثم، فإننا سنركز أولاً على الفضاء المقوّس، لأن المفاهيم فيه واضحة إلى حد ما. وكما في السابق، فمن الأسهل مفاهيميًّا إنقاص عدد الأبعاد التي يجب علينا تصوّرها، ثم نزيد هذا العدد في وقت لاحق. بَيْدَ أننا عندما نفكّر في السّطح المقوّس الثنائي البعد، يبدو أننا بحاجةٍ إلى بعدٍ ثالثٍ لتخيُّل السطح مقوّساً «إلى الداخل»، لذا يمكنك رؤية أنه بغية التفكير في زمكانٍ مقوّسٍ رباعي الأبعاد، فعلينا التفكير في خمسة أبعاد! أنا لا أطلب منك فِعْلَ ذلك، لأنّ هذا يتجاوز فهمي (وَفَهْمَ جميع من أعرفهم)، لكنْ إذا أردتَ تكوينَ تصور تامٍّ لزمكانٍ مقوّسٍ فإن هذا هو ما يجب عليكَ محاولةُ عملِهِ. المصطلحُ التّقنيُّ للتفكير في زمكانٍ مقوّسٍ في فضاءٍ ذي بعدٍ إضافي واحد هو «طَمْرُ» embed الفضاء

الأول في الفضاء الثاني. فلَتصوُّر زمكان مقوّسٍ رباعي الأبعاد، علينا طمره في فضاءٍ خماسيّ الأبعاد.

لنواصِلْ حاليًّا التعاملَ مع فضاءٍ (لازمكان) مقوّسٍ ثنائي البعد. وللتفكير فيه بأنه مقوّس، نتصور الفضاء ـ 2، أي سطحاً، مطموراً في فضاءٍ ـ 3، أي في حجم. لنفكر في الفضاء ـ 2 بصفته سطح كرةٍ ـ3 (كرة عادية، كالأرض). فكّر الآن في مشهدٍ أكونُ فيه واقفاً على خط الاستواء على خط طول قدره 0° (وهذا يضعني في مكان رطب جدًّا قرب شاطىء إفريقيا الغربي) وتكونُ أنت واقفاً على خط الاستواء على خط طول قدره 90° (وهذا يجعلك قريباً من شاطىء الإكوادور). تُطْلَق صفّارةٌ، وعندها يبدأ كلانا المشيَ باتجاه الشمال، شريطة ألاّ ننحرف شمالاً أو يميناً طوال الرحلة. ولما كنا، أنت وأنا، فيزيائيّيْن نظريَّيْن، فسنتجاهل الصعوبات التي نجابهها خلال اجتيازنا للصحارى والمحيطات والأنهار الجليدية. وفي النهاية، عند وصولنا إلى القطبَ الشماليَّ، نجد نفسيّنا وجهاً لوجه (الشكل 9-13). وعلينا الاستنتاج أن الخطين المتوازيين ظاهرياً يتقابلان حقًّا في فضاءٍ له هذه الهندسة. ويقال عن فضاءٍ تتقاطع فيه جميع الخطوط المتوازية ظاهريًّا عند تحديدها بقدر مناسب ـ أي فضاء لا يوجد فيه خطوط متوازية حقًّا ـ إنه فضاءٌ ذو تقوّسٍ موجبٍ. هذا الفضاء مثالٌ على واحدةٍ من الهندسيات اللاإقليدية التي ذكرتها آنفاً.

أحد الاقتضاءات المباشرة لوجود هندساتٍ لاإقليدية هو أنّ الهندسة علمٌ تجريبيٌّ، وليست (كما كان يَظُنُّ كانط Kant، وهذا ما سنراه في الفصل 10) شيئاً يمكن إثبات صحّته بالمحاكمة العقلية وحدها. لا تصلح المحاكمةُ العقليةُ وحدَها أبداً أن تكونَ دليلاً للحقيقة، كما كا يلحّ أرسطوطاليس، فالمحاكمة العقلية، متحالفة مع التجربة، هي مرشد رائع وموثوق استثنائياً للحقيقة، وهذا ما عبّر عنه غاليليو بطريقةٍ رائعةٍ. ونحن نواجَهُ الآن بالسؤال عمّا إذا كانت هندسةُ الفضاءِ إقليديةً، كما يظن إقليدس وأتباعه منذ 2000 سنة، أم لاإقليدية. وللإجابة عن هذا السؤال علينا اللجوء إلى التجربة كي نرى، مثلاً، ما إذا كنّا سنتقابل وجهاً إلى وجهٍ إذا سرنا على طول مسارين متوازيين مسافةً كافيةً. وقد كان لدى

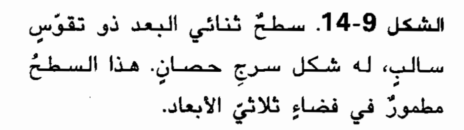


الشكل 9-13. أنت تنطلق في رحلتك من خط الإستواء، ثم تسير شمالاً على خط طول غرينتش (الطول 0 درجة) مع بقاء وجهك متجهاً إلى الأمام. وأنا أفعل الشيء نفسه من خط الاستواء، ولكنْ على خطّ الطول 90°. وعندما نبلغُ القطبَ الشماليَّ يتلامس أنْفَانا. لذا فإن خطَّي الطولِ هذين ليسا متوازيينْ: فلا وجودَ لخطّين متوازيين في هذه الهندسة. ويوضح هذا الشكل أيضاً كيف نتصور سطحاً ثنائي البعد ذا تقوس موجب منتظم بوصفه سطح كرة ثلاثية الأبعاد. ونقول إن السطح الثنائي البعد «مطمورٌ» في فضاءٍ ثلاثي الأبعاد.

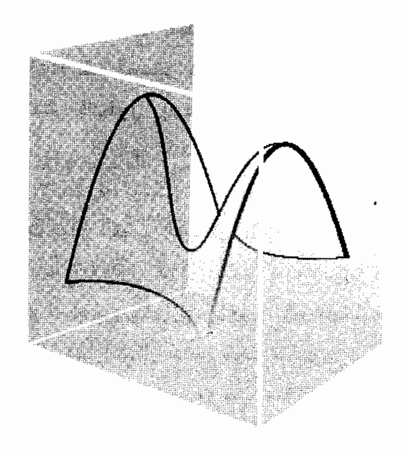
كارل غاوْسْ (1777-1855) C. Gauss - وهو واحد من أعظم الرياضيين جميعاً - فكرةٌ غامضةٌ مفادها أنه قد يوجد للهندسة الإقليدية هندساتٌ منافِسَةٌ، وذلك عندما قال:

لذا كنتُ، في الحقيقة، أعبّر على سبيل المزاح من وقت لآخر، عن رغبتي في ألاّ تكون الهندسة الإقليدية صحيحةً.

وما إن كُسِرَ مفهوم وحدانية الهندسة الإقليدية، وهذا ما أنجزه رئيسيًّا الرياضيّ الألمانيّ الذي مات صغير السن برنارد ريمان (1826-1866) B. Riemann، وذلك في محاضرةٍ استثنائية ألقاها عام 1854 - بغية تثبيته أستاذاً في جامعته - حتى تحرّرت عقول الناس من العبودية للهندسة الإقليدية، وبدأوا يتصوّرون وجودَ فضاءاتٍ لاإقليديةٍ ذات هندسة سالبة أيضاً. ويبيّن الشكل 9.14 سطحاً ثنائي البعد ذا تقوسٍ سالبٍ مطموراً في فضاء ثلاثي الأبعاد. وعندما تجلس على سرج، فإنك تكون محمولاً على سطح ثنائي البعد ذي تقوس سالب. ويوجد في هذا الفضاءِ عددٌ غيرُ منتهٍ من الخطوطِ المتوازيةِ المرسومةِ من نقطةٍ معطاةٍ.



الشكل 9-14. سطحٌ ثنائي البعد ذو تقوّسٍ سالبٍ، له شكل سرجِ حصانٍ. هذا السطحُ مطمورٌ في فضاءٍ ثلاثيّ الأبعاد.



وبعد تجاوزِنَا هذه الصدمة المفاهيميّة، وقَبولِنَا بأن ثمة أنواعاً مختلفةً من الهندسية اللاإقليدية، يمكننا البدء بتصوّر أنّ من الممكن أن تتغير هندسة الفضاء من مكانٍ إلى آخر. وهذا يعني أنه يمكن أن يكون لمناطق مختلفةٍ من الفضاء تقوّساتٌ مختلفةٌ. فمثلاً، يمكن أن نفكّر في فضاءٍ نحصل عليه بضغط كرةٍ نحو الداخل على طول خط استوائها ليصبح لها خَصْرٌ. لهذا الفضاء تقوُّسٌ موجب قرب قطبيه وتقوس سالب شبيه بِسَرْجِ الحصان قرب خطّ استوائه. ويمكننا السّيرُ شوطاً أبعد لِنَرَى فضاءاتٍ أعقدَ، وذلك بضغط السّطح بأصابعنا لنحصل على فوّهاتٍ صغيرةٍ تنتشر على الشكل، وعندئذٍ يتغيّر التقوّس من مكانٍ إلى آخر. قد تَوَدُّ التفكيرَ في أشياءَ متنوعةٍ تراها في حياتك اليوميّةِ لها سطوحٌ تقوّساتُهَا تختلفُ من مكانٍ إلى آخر (أنت نفسك، مثلاً).

عندما نفكّر في فضاءاتٍ مطمورةٍ في فضاءات لها بعدٌ إضافيٌّ، فإننا نعتمدُ وجهةَ نَظَرِ مخلوقٍ مفرطٍ hyperbeing متغطرسٍ قادرٍ على فحصِ العالَمِ الحقيقيِّ، والحكمِ بنظرةٍ واحدةٍ على أنّ هذا العالَمَ مقوَّسٌ أم لا. ومع ذلك، لنفترضْ أننا، كالنملة، مقيَّدون خياليًّا بالفضاءِ الحقيقيِّ الذي نقطنُه: فهل يمكن لنملةٍ أن تعرف ما إذا كانتْ أرضُنَا مقوّسةً؛ وهل يمكننا نحن معرفةُ ما إذا كان زمكانُنا مقوّساً؟ الجواب نجده في ثنايا مناقشتنا السابقة، إذ إنّ الرحلاتِ التي

قمنا بها، أنت وأنا ـ سواءً أكانت تنتهي بتقابلنا وجهاً لوجه دوماً أم لا ـ يُمكن التفكير فيها بأنها تحدث على سطحٍ بقطع النظر عمّا إذا كان هذا السطحُ مطموراً أمْ لا. وهكذا، فإذا انطلقْنا، أنتَ وأنا، على مساريْن متوازييْن ظاهريًّا، وانتهينا وجهاً لوجهٍ، عندئذٍ نعرف أنّ للفضاء الذي نقطنه تقوّساً موجباً. والنتيجةُ مستقلّةٌ عمّا إذا كان بإمكاننا تخيّل الفضاء مطموراً في فضاءٍ له بعدٌ إضافيٌّ أم لا.

يمكننا تطويرُ هذا التفكيرِ شوطاً أبعد، وَنَصِلُ إلى قياسٍ كمِّيٍّ لتقوّسِ فضاءٍ. تعالَ معي إلى القطب الشماليّ (الشكل 9-15). وبعد وصولنا إليه، سيمدّ كلانا إحدى ذراعيه ويوجّهها مباشرةً نحو الجنوب على خطّ الطول 0، أي نحو غرينتش، فإذا أُطلقتْ صفّارةٌ، فإنّك ستسير جنوباً إلى أن تصل خط الاستواء. ومع إبقاء ذراعكَ موجهةً جنوباً، سِرْ على خطّ الاستواء إلى أن تصل إلى الطولَ 90 غرب غرينتش. وفي تلك النقطة عُدْ ثانيةً إلى القطب الشماليّ محافظاً على اتجاه ذراعك جنوباً. وفي الوقت المناسب، أراك تسير على الأفق. بَيْدَ أن المفاجأةَ التي تحدث لنا هي أنّ ذراعك تتجه الآن بحيث تؤلف زاويةً قدرها 90 درجة مع ذراعي، برغم حقيقة أنك أبقيتَ ذراعكَ متجهةً جنوباً طوال رحلتك كلِّها! وفي فضاءٍ منبسطٍ، سيتطابقُ اتجاهَا ذراعيْنا، ومن ثَمّ يتعيّن علينا الاستنتاجُ أنّ السطحَ الحقيقيَّ للأرض ليس منبسطاً. وفضلاً عن ذلك، يمكن تحديد القياس الكمّيّ «للتقوّسِ» بوصفه التغيّر في زاوية ذراعكَ مقسّماً على مساحة المنطقة التي يحيط بها خط سيرك، لذا فالتقوس يساوي 1/(نصف القطر)^2، حيث نصف القطر هو نصف قطر الأرض[17]. وبسبب كون نصف قطر الأرض مساوياً 6400 كم، فإن تقوّسَ سطحها هو 2.4×10^{-8} كم^2. هذا تقوّسٌ طفيفٌ جدًّا، ويشير إلى أنه يجب علينا السّيرُ حول مساحةٍ كبيرةٍ جدًّا قبل أن يصبح التقوّسُ محسوساً. هذا هو السبب في أنّ مسّاحي حمورابي لم يلاحظوه: فلم تكن مساحة الحقول التي قاسوها ما بين النهرين تتعدّى بضعة آلافٍ من الأمتار المربعة، ولم يكن يظهر تقوّسُ الأرضِ. إن تقوّسَ كرةِ قدمٍ، التي نِصْفُ قطرها

(17) إن التغير في زاوية ذراعك يساوي $\pi/2$ راديان، ومساحة ثُمْنِ الكرةِ التي نصف قطرها r تساوي $1/8\times(4\pi r^2)$، أو $\mp\pi\rho$؛ لذا فإن التقوس هو: $(\pi/2)(1/2\pi r^2) = 1/r^2$.

الشكل 9-15. يمكن قياس تقوّس سطحٍ دون التفكير فيه بأنه مطمور في فضاء له بعدٌ إضافيّ. إحدى الطرائق لذلك هو عملُ دارةٍ circuit حول النقطة التي ندرسها، ودراسةُ التغيّرِ في زاويةِ خطٍّ موجّهٍ. فمثلاً، إذا وقفنا، كما هو مبيَّن في الشكل، في القطب الشمالي وإحدى ذراعينا تتجه جنوباً وسرنا نحو خط الاستواء على خط الطول 90 درجة غرب غرينتش، ثم سرنا على طول خطّ الاستواء إلى خط زوال غرينتش، ثم عدنا شمالاً إلى القطب الشمالي، وأبقينا ذراعنا طوال الطريق متجهةً جنوباً، فعندما تَصِلُ نجد أنّ ذراعَكَ تتجه بحيث تصنعُ زاويةً قدرها 90 درجة مع ذراعي. يمكننا الاستنتاجُ من هذه الملاحظة أنّ تقوّسَ السطحِ يساوي 1/(نصف القطر)^2، حيث نصف القطر هو نصف قطر الكرة.

قرابة 10 سم، يساوي 0.01م$^{-2}$، لذا فإن تقوّسها قابل للكشف في تلك المناطق من سطحها التي تغطّي مساحاتٍ صغيرةً جدًّا. وفي حال كرةٍ، فإن التقوّسَ لا يتغيّر من نقطةٍ إلى أخرى، فهو نفسه في جميع نقاط سطحها. التقوّس هو موجب أيضاً أينما كان. ولبيضة الدجاج تقوّسٌ موجبٌ أينما كان، لكنه يقع بين نحو 0.2 سم$^{-2}$ و 0.4 سم$^{-2}$ تقريباً، وذلك في طرفها المقوس بِحِدَّةٍ.

لسنا ملزمين بالقيام بالرحلة على سطح أرضٍ ماديّةٍ حقيقيةٍ، أو كرةِ قدمٍ، أو بيضةِ دجاجٍ، لكشف التقوّس. فإذا بقيتُ أنا ساكناً، وارتحلتَ أنتَ في فضاءٍ خالٍ حول عروةٍ مغلقةٍ، ورأينا أن ذراعينا في نهاية رحلتك تشيران إلى نفس الاتجاه، فسنكون قادريْن على استنتاج أن تلكَ المنطقة من الفضاء منبسطة وإقليديةٌ. وإذا وجدنا أن ثمة زاويةً بين اتجاهيهما، فعندئذٍ يتعين علينا أن نستخلصَ أن منطقة ذلك الفضاءِ مقوَّسةٌ، وم ثَمَّ فهي لاإقليدية. في تلك الحالة، يبيِّنُ الاتجاهُ النسبيُّ لذراعيْنا إشارةَ وكِبَرَ التقوّسِ لتلك المنطقة من الفضاءِ.

وعموماً، قد توفِّر الرحلاتُ عبر المناطقِ المختلفةِ من الفضاء نتائجَ مختلفةً. بل يمكننا أن نجد أيضاً أن المساراتِ المختلفةَ لرحلةٍ على شكل عُرًى loops 100 مغلقةٍ حول نفس النقطة تعطِي نتائجَ متباينةً. هذا هو نمط التجربة التي يمكننا إجراؤها لتعيين نوع الهندسة السائدة في كلِّ منطقةٍ من الفضاء.

نحن بحاجة إلى مفهومٍ آخر قبل أن نفهم تماماً خاصِّيَّات الفضاء المقوَّسِ. الخطُّ الجيوديسيُّ goesesic هو مسارٌ عبر فضاءٍ لا يتباعد إلى اليمين أو اليسار. وفي فضاء منبسط، الخط الجيوديسيّ هو مستقيمٌ. ويبحث قسمٌ كبير من الهندسةِ الإقليديةِ في خاصّيّاتِ الأشكال (مثل المثلثاتِ والمستطيلاتِ) المكوَّنة من خطوطٍ جيوديسيّةٍ - خطوط مستقيمة - في فضاء منبسطٍ. وفي أيِّ نوعٍ من الفضاءات، فإن أقصرَ الطُّرُقِ بين نقطتين يقعْ على الخط الجيوديسي الذي يصل بين هاتين النقطتين. وعلى سطح كرة، يقع أيّ خطٍّ جيوديسيٍ على دائرةٍ عظمى. فمثلاً، إذا سرْنَا على خطّ طولٍ (مثل خطِّ الزوالِ المارِّ بغرينتش)، فإننا نرسم خطًّا جيوديسيًّا بين موقعينْ لهما نفس الطول. وذا وقعت النقطتان على خطّيْ طولٍ مختلفيْن، مثل لندن ونيويورك، فإن أقصر مسافة بينهما هي القوس الأصغر من الدائرة العظمى المارة بِتَيْنِكَ النقطتيْن. وعموماً، تسلكُ الطائراتُ التجاريةُ خطوطاً جيوديسيّة إلى المطارات التي تتوجه إليها.

حان الوقت الآن للانتقال من الفضاءِ المقوَّسِ إلى الزمكان المقوّس. هذا الانتقال ليس مخيفاً كما قد تتوقع، لأنّ معظم المفاهيم التي نحتاجها يمكن استيرادها من دراستنا للفضاءات المقوّسة. ولِتَصَوُّرِ زمكانٍ مقوّسٍ، يمكننا التفكيرُ في سطحٍ ثنائيِّ البعد - أحد بعديه للمكان والآخر للزمن - مطمورٍ في فضاءٍ ثلاثيّ الأبعاد، تماماً كالطريقة التي تصوّرْنَا بها فضاءً ثنائيّ البعدِ. وإذا كان الزمكانُ منبسطاً، فالخطوطُ الجيوديسيةُ هي خطوطٌ مستقيمةٌ على السّطح. لكنْ الهندسةَ الطريفةَ للزمكانِ تتطلبُ أن يكون الخطُّ الجيوديسيُّ الواصلُ بين أي نقطتين موافقاً لأطول فاصل interval بينهما (تذكّرْ كاستور وبولاكس). ويمكن تمثيل زمكانٍ مقوّس ثنائيِّ البعدِ بملاءةٍ ملتويةٍ من الورق في أبعادٍ ثلاثة. وتماماً كما هو الحال في الزمكان، فإن الخطوط لجيوديسيّة - التي قد تتلوّى الآن عبر

السطح، وهذا يتوقف على تقوّسه الموضعي ـ تقابلُ أطولَ الفواصلِ بين النقاط التي تصلُ هذه الفواصلُ بينها.

والآن، نصل إلى لبِّ هذه الدراسةِ كلِّها. وهذه هي النقطة التي تجمع كلَّ المفاهيم السابقة معاً. الفكرة العظيمة التي قدّمها آينشتاين عام 1915 هي أن المادَّةَ تُقَوِّسُ الزّمكانَ. كان إنجازُه الاستثنائيُّ اكتشافَ العلاقةِ الدقيقةِ بين التقوّسِ المفصَّلِ للزمكانِ وتوزّعِ المادّةِ. قد لا يكون بوسعي إعطاؤك العلاقَة الدقيقةَ، التي تُعَدُّ واحدةً من أكثرِ العلاقاتِ المعقّدةِ أناقةً في العالم كلِّه. لكنّني قد أكون مخطئاً في تركك الآن بعد أن دفعتُكَ لبذل جهدٍ كبير لإيصالك إلى هذه النقطة. لذا فإنني سأعمل شيئَيْن، أوّلهما إعطاؤك لمحةً عن نمط النتيجةِ التي توصّل إليها آينشتاين. بعد ذلك، سأقدّم خلاصةً لبعض تداعياتها.

عند هذه النقطة، أطلبُ منكم تصوُّرَ مكعّبٍ حروفهُ مقوّسةٌ قليلاً، وهو يشبه قليلاً مكعّباً مصنوعاً من المطّاط وقفتَ عليه، وهذا يجعل أطرافه تنتفخ قليلاً نحو الخارج. السِّمةُ الإضافيةُ التي أطلبُ منكم التفكيرَ فيها، هي مكعّبٌ في زمكانٍ، لا مجرّد مكعبٍ في الفضاء. وكي أكون صريحاً تماماً، فإنّ التفكير في مكعّبٍ مكانيٍّ عادي، جَيِّدٌ إلى حدٍّ ما لنقْلِ جوهرِ ما أريدُ قولَهُ، لذا لا تتردَّدْ في التفكير فيما طلبتُه منكَ. ومع ذلك، لا تَنْسَ أنه يجب علينا التحدّثُ في الحقيقة، بلغةِ الزمكان، لا بلغة المكان.

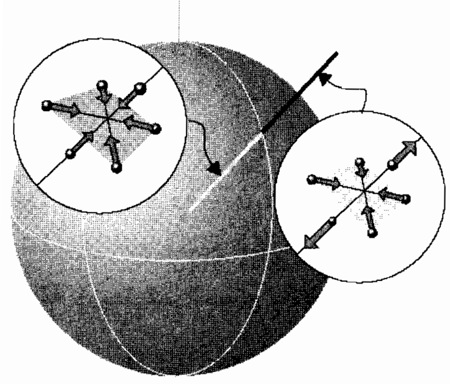
تذكّر المكعّبَ المفرطَ الرباعيَّ الأبعادِ الذي ناقشناه في وقت سابق (ورسمناه في الشكل 9-4). ومن الآن فصاعداً، يجب التفكير في حروف المكعبات التي تكوّنه بأنها تقع على طول خطوطٍ جيوديسيّةٍ في منطقةِ الزمكانِ التي نتناولها. هذا يعني أن علينا التفكيرَ في الحروف بأنها ملتويةٌ ومائلةٌ قليلاً، لكنْ بطريقةٍ ينسجمُ بعضُها مع بعض عند طيّها لتكوِّنَ المكعّبَ المفرطَ. فكّرْ في مكعبِنَا المفرطِ الذي لُصِقَتْ أجزاؤه معاً بعنايةٍ وكأنه موضوعٌ على الكتلةِ الموجودة في جواره. إن أهمية المكعبات تبقى على حالها دون تغيير، حيث تكون محتوياتُ المكعّباتِ الشبيهةِ بالزمانِ (تلك التي تمثل تاريخ الدخول والخروج عبر وجهٍ من الصندوق الحقيقي) ممثِّلةً للكتلةِ المتدفقةِ إلى ومن المنطقةِ الشبيهة

بالصندوق عبر وجوه مختلفة، ويكون المكعبان الشبيهان بالمكان (الصندوق الموجود في بداية ونهاية المدة الزمنية التي نحن بصددها) مُمَثِّلَيْنِ للكتلةِ الكليةِ في الصندوقِ بدايةً ونهايةً. وكلّ ما تفعله «معادلة الحقل» لآينشتاين، هو التعبير عن أنّ التواءَ وميلان وجوهِ المكعباتِ الثمانيةِ، التي تؤلف المكعبَ المفرطَ، يتناسبان مع الكتلة الكلية داخل كل منها[18]. هذه هي النسبية العامة في قشرة بندقة (ويعترف الجميع بأنها قشرة بندقة في زمكان رباعي الأبعاد).

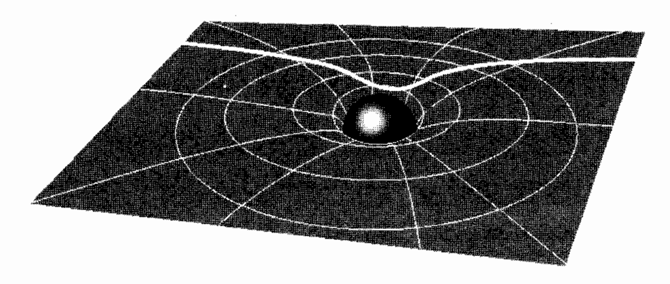
من السهل كتابة معادلة الحقل لآينشتاين (شريطة أن تكون الرمزية غنية)، لكنّ حلَّها بالغُ الصعوبةِ. ومع ذلك، فقد وُجد حلٌّ بعد مضيٍّ بضعة أشهر من صوغها أوّلَ مرّةٍ. وفي واحدٍ من الإنجازاتِ القليلةِ الإيجابية للحرب العالمية الأولى، نجح الرياضيُّ الألمانيُّ كارل شفارتزشيلد K. Schwarzchild (1916-1873)، الذي كان يحارب في روسيا، في إيجاد حلٍّ لمنطقة الفضاء الواقعة خارج منطقةٍ كرويةٍ من الكتلة، مثل الفضاء الخالي الذي يحيط بنجم أو كوكب، وحلٍّ للقسم الداخلي من كرةٍ منتظمة الكتلة. وقد مات بعد بضعة أشهر من ذلك نتيجةَ إصابتِهِ بمرضٍ جلديٍّ نادرٍ بعد إعادتِهِ إلى بلاده لكونِهِ غيرَ صالحٍ للخدمةِ العسكريّةِ، لكن المصطلحيْن "حلّ شفارتزشيلد" و"نصف قطر سفارتزشيلد" خلّدا ذكره. وفي عام 1934 وجد حلا آخر كلٌّ من روبرتسون H. P. Robertson ووُوكر A. G. Walker لزمكاناتِ جميع نماذج الكون المتناحيةِ isotropic والمتجانسةِ والمتمدّدةِ بانتظامٍ.

لنتصور خروجاً من مركز أرضٍ منتظمةٍ إلى الفضاء خارجها، ولنفكّر في هيئةِ الزّمكان. لفعل ذلك، سنفكّر في ترتيبٍ لست نقاط من زوايا مثمَّنٍ منتظم في الفضاء (الشكل 9-16). إنّ تقوّسَ الزمكان داخلَ الأرض «قابلٌ للتقلُّص» contractile بمعنى أن النقاطَ الستَّ تقع قريباً بعضها من بعض بدرجةٍ أعلى

(18) كي لا تشعرَ أنك مخدوعٌ تماماً، فإنني أورد فيما يلي معادلة الحقل لآينشتاين: مجموع عزوم الدوران لوجوه كلٍّ من المكعبات 3 = $\pi 8$ × (طاقة الاندفاع ضمن المكعبات – 3) وبعبارة غير دقيقة، فإن «عزم الدوران» هو فتل twist وجهٍ لأحد المكعبات ـ 3 مضروباً في المسافة بين الوجه والمركز.



الشكل 9-16. يمكن للقوة المدّيّة للثقالة أن تُكْشَفَ إذا أدخلنا في الاعتبار ستَّ كتلٍ اختباريّةٍ مرتبةٍ في مُثَمَّنٍ. والكتلتان الموجودتان على طول الاتجاه المبتعد عن مركز الأرض (أو أيّ جسم ضخم) تُسْحَبُ بعيداً إحداها عن الأخرى، لكنَّ الكتلَ الأربعَ في المستوي الرّماديّ تُسْحَبُ ليتقربَ بعضُها من بعضٍ. هذه هي السِّمةُ المميِّزةُ لحلّ شفارتزشيلد الخارجيّ. وفي داخل الأرض، حيث تكون الهندسةُ معطاةً بحلّ شفارتزشيلد الداخليّ، فإن جميعَ الكتلِ الستِّ تُسْحَبُ ليقتربَ بعضُها من بعضٍ.



الشكل 9-17. إن تأثير جسمٍ ضخمٍ يتجلّى بتشويه المكان، وهذا يشبهُ تأثير كرةٍ ثقيلةٍ موضوعةٍ على ملاءة مطاطية. وتسير الجسيماتُ على طول خطوطٍ جيوديسيةٍ (نبيّن أحدَها بالخطِّ الأبيض السميك) ولما كانت الخطوط الجيوديسية تتلوّى عبر الزمكانِ المقوّسِ، فإن الحركة المستقرة على طولها قد تبدو لراصدٍ كمسارٍ مجذوبٍ من قِبَل الجسم الثقيل. وإذا كان باستطاعتنا إظهار البعد الزمنيّ أيضاً، فعندئذٍ سنشاهد أيضاً ما نفسّره بأنه تسارعاتٌ وتباطؤاتٌ خلال اقتراب الجسم من منطقة الكتلة الثقيلة ثم ابتعاده عنها.

مما هو الحال في الفضاء الخالي. ويبدو هذا وكأن الزمكان نفسَه محشورٌ داخل الأرض. وهذا السلوكُ إثباتٌ لحلِّ شفارتزشيلد الداخليّ لمعادلة آينشتاين لمنطقة كروية لكتلةٍ منتظمةٍ. ويمكننا التفكيرُ في خطوطِ السقوطِ الحرّ بصفتها تقع قريبةً بعضها من بعض داخل الأرض، وفي الزّمكانِ الرباعيِّ الأبعادِ بصفته يملك تقوساً موجباً - كالكرة - له نفسُ القيمةِ في كلِّ مستوٍ ذي بعدَيْن أحدهما زمانيٌّ والآخر مكانيٌّ. والتقوّسُ في كلِّ مستوٍ ثابتٌ ضمن المنطقةِ ذاتِ الكثافةِ المنتظمةِ،

ويمكننا، إلى حدٍّ ما، التفكيرُ في التقوُّسِ بأنه شبيهٌ بتقوّسِ ملاءةٍ مطاطيّةٍ في المنطقةِ التي وُضِعَ عليها كرةٌ ثقيلةٌ (الشكل 9-17).

وما إن يندفع صَفِيفُ النّقاطِ الستّ خارجاً عبر سطح الأرض، ويدخل الفضاء الخاليَ في الخارج، فإن الحلّ الداخليّ لشفارتزشيلد يُفسح المجال لحلّه الخارجي. إن هندسة الزمكان «مَدِّيَّةٌ» tidal الآن، بمعنى أن النقطتيْن العموديتيْن على السطح تبتعدان إحداهما عن الأخرى بالسرعة التي تتحرك بها النقاطُ الأربعُ في مستوٍ موازٍ للسطح معاً، مع بقاءِ الحجم الذي تحيط به ثابتاً. ويمكننا التفكيرُ في الأثرِ في الفضاء بتمديده باتجاهٍ واحدٍ (على طول الاتجاه الذي يشير إلى الكتلةِ المشوِّهَةِ) ودفعه بالاتجاهيْن المتعامديْن. وما من شكٍّ في أنّ هذا الأثر المدِّيَّ مُهْمَلٌ: فالأثر الذي للأرضِ كافٍ لتشويه كرويّةِ القمرِ الصُّلبِ بنحو كيلومترٍ. إن الحركاتِ المدّيّةَ لمحيطاتنا هي مظاهر لتأثير القمر على هندسة الزّمكانِ عند سطح الأرض، علماً بأنه يوجد مدّان عاليان يوميًّا، وهذا مظهرٌ لانتفاخِ الهندسةِ على طول اتجاه الأرض ـ القمر. لذا فعندما تقف قربَ الشاطئ وتشاهدُ انحسارَ المدِّ وتَعَاظُمَهُ، فإنك تشاهدُ ظلَّ هندسةِ شفارتزشيلد يمرّ فوق سطح الأرض.

يمكن وضع أعدادٍ للتقوس. فالتقوس القطري radial (تقوس مستوٍ أحد جانبيه على طول الاتجاه القطري، والآخر على طول محور الزمن) يساوي - **2** × الكتلة/(نصف القطر)[3]، حيث نصف القطر radius هو المسافة بين النقطةِ التي تهمنا ونقطة التركيز الكرويّ (للنجم، أو الكوكب، الشكل 9-17). لاحظْ أن هذا التقوّسَ سالبٌ (بشكل السّرج)، تماماً مثل ملاءة المطاط في المنطقة خارج النطاق الذي تستند إليه الكرة. ولكلٍّ من المستويين، اللذيْن لهما جانب عمودي على الاتجاه القطري وجانب على طول اتجاه الزمن، تقوّسٌ يساوي "الكتلة/(نصف القطر)" هذا التقوّس موجبٌ، لذا يمكننا التفكير في كلٍّ من السطحيْن الثنائيَّي البعد كما نفكّر في سطحِ كرةٍ. وهذان التقوّسان يحفظان حجم مكعّبٍ ـ 3، لأن الامتداد في اتجاهٍ يُلْغَى بالانضغاطيْن الطفيفيْن بالاتجاهين العموديّيْن.

وفضلاً على ذلك، فإن التقوسَ يتناقص كلما ابتعدنا عن مركز الأرض؛ وعلى مسافاتٍ كبيرةٍ من الأرض يكون الزمكان منبسطاً.

إحدى سمات هندسة شفارتزشيلد هي أن الميقاتيّات تدور بسرعة أبطأ عند وضعها قريباً من جسمٍ كبيرِ الكتلةِ. والتباطؤ الكسريُّ، عند مقارنته بدوران ميقاتيةٍ بعيدةٍ عن الجسم الكبير الكتلة، هو "الكتلة/المسافة"، حيث المسافة هي المسافة التي تفصل الميقاتية عن مركز الجسم الضخم. وإذا كنا نفكر في تأثير كتلة الأرض في ميقاتية محمولة على متن طائرة، فعلينا أن نُدخِل في الحسبانِ أنّها تدور بسرعةٍ أعلى من دوران ميقاتية على مستوى سطح البحر (لأن الطائرة أبعد قليلاً عن مركز الأرض، وفي منطقةٍ من الزمكان ذات تقوّسٍ أصغر)، لكن الزمن يتقدم بسرعةٍ أبطأ لأن الطائرة متحركة. الأرض صغيرة (فكتلتها 4.4 مليمتر فقط)، لذا فإن تأثيرَ حركةِ طائرةٍ تجاريّةٍ طفيفٌ. ومع ذلك، ففي رحلةٍ حول العالم على ارتفاع 10000 متر وبسرعة 850 كم/سا، يسرِّعُ التأثيرُ التثاقليُّ الميقاتيةَ بنحو 0.2 مكروثانية، في حين يبطئها تأثير السرعة بزهاء 0.05 مكروثانية فقط. إن اختباراتِ النسبيّة العامّةِ التي تُجَرى بهذه الطريقة تُدخِل في الحسبانِ تأثيراتِ الهبوطِ والإقلاعِ، وأيضاً السرعةَ المتغيرةَ لطائرةٍ في الجوّ.

●

تُرى، لماذا أوْلَيْنَا الخطوطَ الجيوديسيةَ في الزّمكان هذا القدْرَ الكبيرَ من الانتباه؟ إن الجسيمات تسيرُ، في فضاءٍ خالٍ، وفق خطوط مستقيمةٍ. وبعبارةٍ أخرى، فإنها تسير على طول الخطوط الجيوديسية للزمكان المنبسط[19]. وتؤكّد هذه الملاحظةُ أهميةَ الهندسة في تعيين المسارات. ومع تشوه الزمكان بواسطة وجود كتلةٍ ـ مع اقترابنا أكثر فأكثر من نجمٍ ـ تواصل الجسيماتُ رحلتَها على طول الخطوط

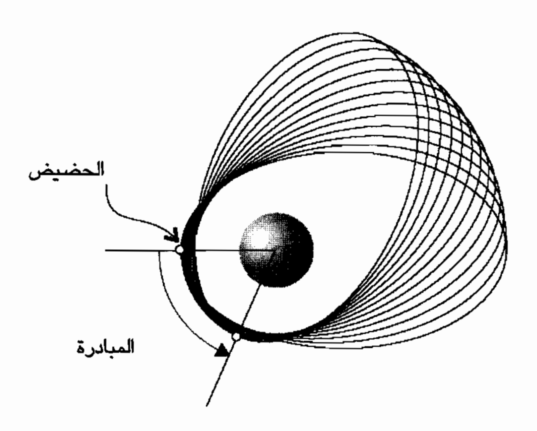
(19) تُرى، لم تفعل ذلك؟ السبب هو أن الدوالَّ المُوَجِيَّةَ تُلغَى في جميع المسارات الأخرى، كما رأينا في الفصل 7.

الجيوديزية، لكنّ هذه الخطوطَ هي الآن مقوسةٌ. وفي الحقيقة، فقد يكون تقوّسُ الزّمكان كبيراً جدًّا في منطقةِ جسمٍ كبيرِ الكتلةِ، كالنجمِ مثلاً، وهذ يجعل الخطوط الجيوديسيّة تُفْتَلُ وتتحوّلُ إلى لولبٍ (حلزونٍ). وبكلمات أخرى، فمع تقدم الزمن، يبدو أن كوكباً يتحرك بحركةٍ تكرارية تقريباً في مسارٍ مغلقٍ تقريباً - كأنْ يكونَ قطعاً ناقصاً (إهليلجاً) تقريباً - حول النجم. أي أن الكوكب الذي يتحرك على طول خطٍّ جيوديسيٍّ في الزمكان يرسم مداراً مغلقاً تقريباً في الفضاء. وبعيداً عن النجم - بلوتو بدلاً من عطارد - يكون الزّمكان أقلَّ تقوساً، ويكون الكوكبُ بحاجةٍ إلى وقتٍ أطول قبل أن يصبحَ مسارَهُ مغلقاً تقريباً. وبعبارةٍ أخرى فإن الكوكبَ البعيدَ يدور حول نجمه بسرعةٍ أبطأ من الكوكب القريبِ من النجم. وفي الحقيقةِ، فإنّ مساراتِ الكواكبِ ليستْ قطوعاً ناقصةً كاملة، إذْ إنها ترسم مساراتٍ مختلفةً في كلِّ دورةٍ لها حول النجم، وترسُمُ لراصدٍ على الأرض شكلَ وردةٍ حول النجم المركزيّ. إن معرفةَ الشكل الحقيقيِّ لمسارِ عطارد الشبيه بالوردة - نتيجةَ معرفة القيمةِ الحقيقيةِ لما يسمى مبادرةَ حضيض - كانت نجاحاً مبكّراً للنسبيّة العامة (الشكل 9-18).

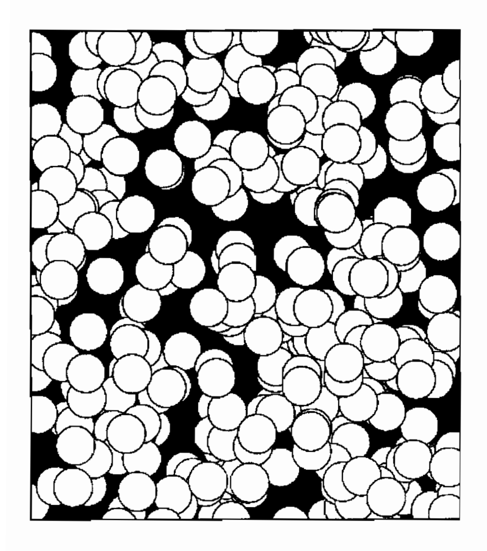
لقد حذفنا الثقالة (الجاذبية). ونحن نرى الآن أن حركة الكواكب ليست استجابةً لقوةٍ تسمى الثقالة، لكنها، ببساطة، الحركة الطبيعية لجسمٍ على طول خطٍّ جيوديسيٍّ في الزمكان. وبعبارةٍ أخرى، إن الحركة هي أحد مظاهر الهندسة.

●

ثمة مشكلةٌ تواجهنا في وصف الزمكان الذي قدّمناه حتى الآن: ففي مقياسٍ صغيرٍ بقدر كافٍ، قد لا يوجد هندسةٌ. إحدى المسائل العظيمة التي لم يُبَتَّ فيها بَعْدُ في الفيزياء الحديثة هي توحيد نظريّتَي النسبيةِ العامّةِ والميكانيكِ الكموميِّ (الفصل 7) في نظريةٍ واحدة هي الثقالة الكمومية quantum gravity. فبرغم الجهود الجبارة، وبرغم إحراز قدر كبير من التقدّم، لم يتمكّن العلماءُ حتى الآن من التوصّل إلى نظريّةٍ موحَّدةٍ. وحاليًّا لا وجودَ لنظريةٍ تسمى «الثقالة الكمومية»، بل يُوجَدُ، عوضاً عنها، كثيرٌ من التخمينات، معظمها مثيرٌ جدًّا للخلاف، ويُعبِّر



الشكل 9-18 ـ وفقاً لنظرية آينشتاين، فإن مسار كوكبٍ (وبخاصةٍ إذا كان الكوكبُ قريباً من النجم الذي يدور حوله، مثل كوكب عطارد) ليس قطعاً ناقصاً تماماً، بل أقرب إلى أن يكون على شكل وردةٍ. إن النقطةَ التي يكون الكوكبُ فيها أقربَ ما يكونُ إلى النجم (حضيض مسار الكوكب) تدورُ حول النجم. تدعى هذه الحركة مبادرةَ precession الحضيضِ. ويتنبّأ الميكانيكُ التقليديُّ (النيوتنيُّ) أيضاً بالمبادرة، لكنه لا يقدّم سوى نصف قيمتها المرصودة، وهي 43 ثانية قوسية كل قرن (0.12 في الألف من الدرجة كلَّ عام). وتتنبأ النسبيّة العامّة بالقيمة الحقيقية لهذه المبادرة. هذا وإن مبادراتِ مساراتِ أنظمةِ النجومِ المضاعفةِ (الثنائيةِ) binary stars أكبرُ بكثيرٍ، إذْ تبلغُ عدّة درجاتٍ سنويًّا، لذا يسهل قياسها.



الشكل **9-19**. إذا استطعنا فحص الزمكان بتكبير عالٍ جدًّا، فإننا نرى أنه ليس متصلاً بل هو أشبه بالزّبد. وبمقياس بلانك للطول والزمن، فإن المفاهيمَ الكلاسيكيّةَ للزمكان غيرُ سليمةٍ. لا أحَدَ يعرف، في الحقيقة، ماذا يحدث بمقياس بلانك، لكنْ ثمة تقدّمٌ يَجْرِي إحرازُه، ووعودٌ تُحدِثُ ثورةً في فهمنا للمكان الذي نوجد فيه.

عنها بدرجاتٍ متفاوتةٍ من التعقيد. لكن حين يُنْجَزُ التوحيدُ، فمن المتوقَّع حدوثُ ثورةٍ في طريقةِ تفكيرنا بالمكان والزمان، ومن المحتمل أن يكون لهذا أثرٌ أعمقُ من ذاك الذي أحدثه تقدمُ النسبية والنظرية الكمومية. بيد أنه على الرغم من الطبيعة الضبابية الحالية لفهم العلماء للثقالة (الجاذبية) الكمومية، فثمة مظاهر معينة نتوقع أن تتسم بها.

ينبثق أحد هذه المظاهر من الحقيقة التالية: على الرغم من الهيئات الخارجية، فقد كنا نملك رؤيةً عتيقةَ الطرازِ لطبيعةِ الزمكانِ، وهي رؤيةٌ مختلفة قليلاً، من وجهة المبدأ، عن فهم نيوتن للمكان. وبالطبع، فقد جعلْنَا الوصفَ أشدَّ تعقيداً بتوحيد المكان والزمان، وتزويد الزمكان الحاصل بهندسة لاإقليدية تعتمد على وجود كتلةٍ. لكن لا يزال ثمةَ معنًى للزمكان بأنه ميدانٌ للفعل يؤدَّى ضمنه جميعُ نشاطاتِ العالَم. وفي الثقالة الكمومية، يتلاشى معنى الميدان، وتحدِّدُ الأحداثُ نفسُها العالَمَ. ومن المحتمل ألاّ يكون وجودٌ للميدان: فما نعدّه العالَم ليس سوى عدد هائل من الأحداث المتشابكة. وبهذا الإدراك، تصبحُ معادلةُ آينشتاين دعوى statement ترتبطُ بالبنية السببيّة للعلاقات بين الأحداث.

السمة الثانية للثقالة (الجاذبية) الكمومية هي أن المفهوم الكلي للزمكان، بمقياسٍ صغيرٍ بقدرٍ كافٍ، يتلاشى. أي أنه بدلاً من أن يُعَدَّ الزمكانُ اتصالاً لأحداثٍ يرتبط بعضها ببعضٍ سببيًّا، فإنه أكثر شبهاً بالزّبد (الشكل 9-19). إن أصغر انفصالٍ مكانيٍّ محتمل للأحداث سبق أن أسميناه طول بلانك، وأصغر انفصالٍ ممكن في الزمان هو ما أسميناه زمن بلانك. طول بلانك يساوي 10^{-35} متر، وهذا أصغر بنحو عشرين مرّةً من قطر نواةٍ ذريةٍ، لذا فمن المدهش أن نظُنَّ، نحن المخلوقاتِ غيرَ الرشيقةِ الضخمةَ، أنّ الزمكانَ متّصل continuum. ولأصغر سطحٍ يمكن أنْ يوجَدَ في الزّمكانِ مساحةٌ قريبةٌ من مربَّعِ طول بلانك، ولأصغر منطقةٍ ثلاثية الأبعاد، يمكنُ أن يكونَ لها وجودٌ، حجمٌ يساوي، تقريباً، مكعَّبَ طولِ بلانك. وبالوحدات التقليدية، يساوي زمن بلانك نحو 10^{-43} ثانية، لذا لا يمكن لحدثَيْن أن يقعا بفاصلٍ زمنيٍّ أصغر من 10^{-43} ثانية. حتى في حال

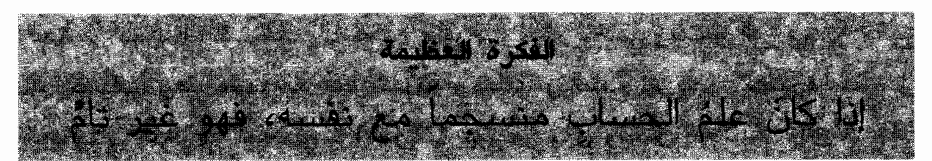
علميةٍ تدوم مليثانية، فإنها يجب أن تكون مؤلّفةً من 10^{40} مركّبة. ولا يمكن لميقاتيةٍ أن تَتِكَّ أكثر من 10^{43} مرة في الثانية.

وكما أنّ ثمّةَ حدًّا أدنى مطلقاً لدرجة الحرارة («الصفر المطلق») في الفيزياء التقليدية، فإن الثقالةَ (الجاذبية) الكموميةَ تبيّن أن ثمة أيضاً حدًّا أعلى مطلقاً، يساوي 10^{32} كلفن تقريباً. وفي درجة الحرارة تلك، ينصهر الزمكان ذاته. إن الانفجار العظيم، الذي كان بدايةَ الكون، ربّما لم يكن كرةً نارية دراميّةً، بل تبرّداً كونيًّا جمَّد الزمكانَ وحوّله إلى شيء مستمر. الهندسةُ، وكل ما رأيناه من اقتضاءاتٍ لهذه الكلمة، هي البصمة المجمَّدةُ لسببيّةِ الأحداثِ.

الفصل 10

علم الحساب

حدود العقل



خَلقَ اللّهُ الأعدادَ الصحيحةَ، وكلُّ ما عداها هو من عَمَلِ الإنسانِ
ليوبولد كرونكر

إنّ أحدُ أروعِ إبداعاتِ العقلِ البشريِّ هو علمُ الحساب، لا لأنه تمجيدٌ للتفكيرِ المنطقيِّ فحسب، بل لأنه، أيضاً، القوةُ الرئيسيّةُ التي تدفعُ التفكُّرَ العلميَّ الصارمَ ليواجهَ التجربةَ. الفرضيّاتُ الرياضيةُ ذاتُها تشبه المادةَ الهلاميّةَ، فهي بحاجةٍ إلى صلابة الصياغةِ الرياضيةِ لمواجهةِ التحقُّق التجريبيّ والتلاؤمِ مع شبكة المفاهيم التي تكوّن العلوم الفيزيائية. ثمة فكرةٌ شائعةٌ على نطاقٍ واسعٍ مُؤدّاها أنّ الرياضياتِ ليست علماً، لأنها، سواءً أردنا أم أبيْنا، تعالِجُ عوالِمَ خاصةً بها، عوالمَ تملكُ علاقاتٍ قليلةً بعضها ببعض، لكنها تتمسك بصرامة المنطق، وبالعالَم الذي يبدو أننا نعيش فيه. ثم إنه قد يُظَنُّ أنّ الرياضياتِ تُقْحِمُ نفسَهَا في هذا العَالَمِ. بيد أنها لمّا كانت مركزيّةً جدًّا في النمط العلميّ من التفكير، فأفضل اعتبارٍ للرياضياتِ هو أنها ضيفٌ مُرَحَّبٌ به، ثم إنه يجب توجيهُ التحيّة إليها بوصفها علماً مشرِّفاً. وفضلاً عن ذلك، وانسجاماً مع دخولِ التجريد إلى العلوم الفيزيائية، ومع اقتحامه العلوم البيولوجية، فإن تحديد أين تنتهي الرياضياتُ وأين يبدأ العِلْمُ أمرٌ صعبٌ، ويُعتبر عملاً تافهاً، وكأنّ ما نفعله هو رسمُ خريطةٍ للأفق في صباحٍ يسوده الضبابُ.

ثمة سببٌ أبعد، لكنْ له علاقة بالموضوع، يفسِّرُ لماذا يكون من المناسب إدخالُ الرياضيات هنا. إن معظم العلماء العاملين، خلال سلوكهم الطرائق الحسّاسة والذرائعية، يُقرّون بالقدرة المذهلة للرياضيات في تقديمِ وصفٍ للعالَم الماديِّ، وهم سعيدون بسبب امتلاكهم هذه الأداةَ العقليَّةَ الفعّالَة. لكنْ هناك من يتجاوزون الاعترافِ بجميلِ للرياضيات وتطبيقاتها، ويفكرون فيما إذا كان التحالفُ المثمرُ بين الملاحظات العلميّة والوصف الرياضي يشير إلى سمةٍ أعمقَ للرياضيات، وهي سمةٌ لم يَجْرِ تعرُّفُها، تماماً، وبالطبع لم يجر تفسيرها بعد. إن الفيزيائيّ النظريَّ المجريَّ ـ الأمريكيَّ يوجين بول وِيغْنَرْ E.P. Wigner (1995-1902)، الذي فعل الكثير لصوغ النظرية الرياضية للتناظر وتطبيقها على المسائل الفيزيائية، أُصيبَ بالذهول من القدرة العالية للرياضيات في تأديةِ دورِ لغةٍ لوصف العالَم:

إن معجزةَ ملاءمةِ لغة الرياضيات لصوغِ القوانين الفيزيائيةِ هي هبةٌ رائعةٌ، وهذا شيءٌ لا نفهمه ولا نستحقّه[1].

وقد عبّر آينشتاين عن فكرة لها علاقة بذلك عندما قال إن أصعب ما يمكن فهمه عن العالَم هو أنه قابل للفهم.

أنا عازم على أن يكون مضمونُ هذا الفصل هو التحدثَ عن الرياضيّات، لا أن يكونَ عَرْضاً للرياضيات ذاتها، ولا حتى لتاريخ الرياضياتِ والأفكارِ التي تكوِّنُها ـ إلاّ عندما أرى أن ذلك له علاقة بموضوعنا، أو أنه لا علاقة له بموضوعنا، لكنه يؤفّرُ شيئاً من التسلية. وبعبارة أخرى، سأتحدث عما يفكّر الرياضيون فيما يفعلونه عندما يبتكرون مبرهناتهم ويحلّون معادلاتهم. لن أكون مهتماً بالتفصيلات المتعلقة بما يفعلونه. لذا لن ترى إثباتاتِ مبرهنةِ فيثاغورس، ولا كيفيةَ حلِّ المعادلةِ التربيعيةِ. فالفصل مَعْنِيٌّ بفلسفة الرياضيات، وتحديداً

(1) لقد ورد هذا النصّ في مقالةٍ بعنوان «الفاعلية غير المعقولة للرياضيات» في المجلة Communications in Pure And Applied Mathematics (1960). وأنا لا أملك فكرةً عمّا يعنيه بقوله «ولا نستحقّه».

بطبيعة الوجود الرياضي mathematical ontology، وهو أساسياتها، ولَسْتُ معنيًّا بالتقنيّات التي تَعَلَّمَها كلٌّ منّا إما للإعجاب بها، وإمّا لينفر ويخاف منها. وبعبارةٍ أخرى، أنا، عازمٌ على استعمال هذا الفصل لأفحص مشروعيّة الفكرة البارعة التي جاد بها برتراند راسل، والتي يقتبسها كثيرون، وهي أن:

الرياضيات البحتة (الصّرفة) هي الموضوع الذي لا نعرفُ فيه عمّا نتحدث عنه، كما لا نعرفُ صحةَ أيِّ شيء نقوله.

وأنا أخشى أن يكونَ لدى معظم قرّائي ذكرياتٌ غيرُ مريحةٍ، وربّما محبطةٌ، عن الرياضيات، أو، على الأقل، أن يكون لديهم أفكارٌ مسبقة غير مريحة عما يتطلّبه فصلٌ مثل هذا. لا تَخْشَ شيئاً، هذا ليس كتاباً تدريسيًّا مقرّراً. إنني أنوي التركيزَ على الأشياء الرائعة، وسأشير إلى المواقع التي يمكنك تجاوزها في القراءة الأولى، على الأقل، دون ترْكِ سلاسة الموضوع. وفضلاً عن ذلك، يتعيّنُ عليكَ أن تتذكّر أنّ هذا الفصل ليس رياضيًّا: إنه قِصّةٌ **عن** الرياضيات.

آخرُ ملاحظةٍ أوليّةٍ أقدّمها تضعُ هذا الفصلَ في منظورٍ آخرَ. لقد تجوّلنا في مواضيعَ متزايدةِ التجريدِ. الرياضياتُ هي ذروة هذه المرحلة، التي يمثل التجريدُ جوهَرَها. لذا علينا توقُّعَ قوةٍ استثنائيةٍ.

●

الصعوبةُ الأساسيةُ في الرياضيات هي أنها تحاول عملَ أشياءَ باستعمالِ الأعداد الطبيعية، 0، 1، 2، 3، ... وهي التي نستعملها يوميًّا في العدِّ. تُستَعمَلُ الأعدادُ الطبيعيّةُ بوصفها أعداداً كاردينالية (أصلية) cardinal numbers، لتقرير عدد العناصر في مجموعة، وبوصفها أعداداً ترتيبية ordinal numbers، لترتيبها في جدول. ولها مفاهيم مختلفة، ونحن نمنحها أسماء مختلفة، مثل واحد، اثنان... للأعداد الكاردينالية، ومثل الأول، الثاني،... للأعداد الترتيبية. ومعظم ما يتعيّن على سرده يتعلّق بالأعداد الطبيعية بوصفها أعداداً كاردينالية.

وكما سنرى بعد قليل، فعندما بدأ الرياضيون التفكيرَ في أسلوبهم العميق

المميَّز في حقل الأعداد الطبيعية، بدا واضحاً أن من المدهش وجود قليلٍ منها، وقد عَجِبَ هؤلاء الرياضيون من تعثّر قدماء البشر بها، برغم قلّتها. ويمكننا البدء برؤية بعض المسائل التي تعذّبُ الرياضيين حتى في هذه المرحلة المبكّرة من المناقشة. فمثلاً، هل تمتدّ الأعداد الكاردينالية إلى ما شاء اللّه؟ أو هل الرياضياتُ فوق المتناهية ultrafinistic mathematics، كما يسمونها، والتي تتوقّف فيها الأعداد الطبيعيةُ قبل بلوغها اللانهاية، هي فكرةٌ أفضلُ من تلك التي لا يوجد فيها للأعداد حدود؟ وإذا أردنا أن نكون صادقين واعترفنا بأنه لا يوجد لدينا استيعابٌ واضحٌ للاّنهاية، فهل البراهين الرياضيةُ التي تَستعملُ اللانهايةَ موثوقةٌ؟ قد يدَّعي كُثُرٌ أنها ليست كذلك، ويعملون كل ما بوسعهم لاستبعاد اللانهاية.

وبالعودة إلى بداية العَدّ، أيّا كان الوقتُ الذي حدث فيه، نجد تجاوباً عميقاً مع العدّ كما نفهمه اليوم (وهذه نقطةٌ سنشرحها لاحقاً). وغالباً ما يُستعان بِعَصَا الحسابِ tally، بوضع علاماتٍ على العصا، أو يُستعان بخرزاتٍ في سُبْحَةٍ، يكون عددها في سُبْحَةِ المسلمين مئةً، وهم يستعملونها لإيراد الصفات الإلهية التي عددها تسع وتسعون (مع خرزةٍ إضافية للإشارة إلى البداية)، أو يستعملون كريّاتٍ صغيرةً تُستخرَجُ من روث الحيوانات الجافّ، أو كومةٍ من الحصيّات. ثمة جهازُ عدٍّ عالميٌّ يمكنُ حمله هو جسم الإنسان الذي يحوى نتوءاتٍ وبعجاتٍ. ويمكن لسكان جزر توريس Torres Straits الوصول بالعدّ إلى 33 (القدم اليمنى، إصبع القدم الصغيرة)، مستعملين العدد 8 (الذراع اليمنى)، والعدد 26 (الورك الأيمن)، والعدد 28 (الكاحل الأيمن)، وهذا يمهد الطريق لاعتبار 33 أساساً لعدّهم. بيد أن اليد البشرية أكثر ملاءمة بكثير كأداةٍ للعدّ، وبخاصةٍ عندما يكون الشخصُ كاملَ اللِّباس. وإضافةً إلى ذلك، فإن اليدَ توفِّر المرونةَ التي تُمكِّنُ من الإشارة إلى كلٍّ من الأعداد الكاردينالية والترتيبية: فالأعداد الكاردينالية يُشار إليها بعرض العدد الملائم من الأصابع في وقت واحد، والأعداد الترتيبية تُعرَض بمد الأصابع على التوالي. لذا فإن العدَّ الذي أساسه 10، الذي يستعمله نظامُ عدّنا، هو نتيجةٌ طبيعيّةٌ للسِّماتِ التشريحيّةِ للإنسان.

ومع أن أساسَ العدِّ استقرّ على العدد 10 المستعمَل عالميًّا تقريباً في هذه

الأيام، فمازال ثمةَ عدّةُ انحرافاتٍ. ففي اللغةِ المستعملةِ في نيوهيبريد New Hebrides، يُعْتَمَدْ 5 كأساسٍ للعدّ، كما نجد آثاراً لهذا الأساس في بعض اللغات الإفريقية. ونجد بقايا العدّ ذي الأساس 12 في استعمالنا للدّزينة (12) و (12x12) وقد حَبَّذَ البابليّون الأساس 60 لأسبابٍ مازالت خافيةً علينا، ويبرزُ اختيارهم هذا في تقسيماتنا للوقت والدائرة، وفي تقسيمات الدقيقة إلى 60 ثانية. وثمة دراساتٌ تبيّن أن السومريين والبابليين استقرّوا على 60 (دون وجود رمز للصفر) كنتيجةٍ لدمج ثقافتيْن، إحداهما تستعمل الأساسَ 10 (القاسمان الأوّليّان هما 2 وَ 5، والأخرى تستعمل الأساس 12 (القاسمان الأوليان هما 2 وَ 3)، وهنا يكون 60 = (2x3) x (2x5) هذا المضاعف المشترك الأصغر لكن الأساس 60 لم يجر اختياره البتة للعدّ اليوميّ، لأنه يتطلب تعلّمَ أسماءَ محدّدةٍ كثيرةٍ جدًّا لستّين عدداً مختلفاً هي [أي 60] 10 و(59 عندنا) * ...," ,9 ,8 ... ,1 ,0).

-

ولدى اللاتينييّن والفرنسيّين بقايا الأساس 20 كما في (1-20 = 19)، وفي أربعة عشرينات (80 = 4x20)، بالترتيب. ويوجد أثر للأساس 20 يمكن رؤيته في الإنكليزية التي تَستعمل كلمةَ (20) Score، واللغة الدانمركيّة التي تستعمل (ثلاثة مضروبة في عشرين) tresintyve للدلالةَ على 60؛ ومازال الأساس 60 مستعملاً بالشكل Tamanas of the Orinoco بفنزويلا، وَInuits في غرينلاند، وAiny في اليابان، و Zapotecs في المكسيك. أما شعب المايا المسكين، الذي كان يستعمل لتقويمه الفلكي رمزاً يشبه الصَّدَفَةَ للدلالة على 0، فكان يستعمل الأساس 20، لكن الرقم الثالث (المئات) كان مؤسساً على 18x20 بدلاً من 20x20، وكان الرقم الرابع مؤسساً على 18x20x20، وهلم جرًّا، وربما كانوا يحاولون تبسيط الحسابات الفلكية، إذ إن طول سنة المايا هي 360 = 18x20.

هذا وإن العدّ على الأصابع غيرُ ملائم لوضعه في سجلاّتٍ، وحين برز المحاسبون الأُولُ، وبدؤوا ينظّمون أعمالهم التجارية، صاروا يضعون علاماتٍ دائمةً على بضائعهم ليسجلوا عليها تعاملاتهم. أما السومريون، فقد استعملوا صيغةً بارعةً من الحروف المسمارية (التي لها شكل أسافين) للدلالة على

مجموعة الأعداد، واستعمل قدماء اليونان الدلالاتِ الأبجديةَ، التي كان لها رموزٌ مثل Δ للدلالة على 10 (deka)، وM للدلالةِ على 000 10 (muriori). هذا وإن الذي مازال موجوداً حتى اليوم في عددٍ من التطبيقات اليوميّة هي الأرقام الرومانيّة. وبمعزلٍ عن الأرقام الواضحة ...,I,II، التي نكتبها الآن بالأشكال ...,1,2، فقد خمّن المؤرخُ الألمانيُّ تيودور مُومْسِنْ (1903-1817) T. Mommsen أنّ V(= 5) هو تمثيلٌ ليدٍ مبسوطةٍ، وأنّ X(= 10) هو اتحادٌ يديْن اثنتين، وأنّ M(= 1000) هو تشويه للرمز Ø، حيث يمثل (I) وَ D(=500) نصف هذا الرمز (Ø).

ويبدو أن أرقامنا «العربيّة» المألوفة ظهرت في الهند في وقت ما قبل القرن التاسع، وربما بوصفها تمثيلاً للمعداد abacus. والسبب في تسميتها «عربيّة» من قِبَلِ العلماء الغربيين في ذلك الوقت، هو أن العِلْمَ العربيَّ كان مسيطراً، وكان هو المرجعَ الرئيسيَّ للكتّابِ والعلماء. ومع أن أصولَ صيغِ معظمِ الأعدادِ مجهولةً، لكنْ من الواضح أن 2 ربما كانت اتحاداً لخطين قصيرين أفقيّيْن، وأن 3 اتحادٌ لثلاثة منها. ويبدو أن البشر غير قادرين على تقدير قيمة العدد عندما يكون عدد أرقامه أكثر من أربعة بلمحة سريعة، ومن ثَمَّ، يبدو أنّ الأعداد من 4 إلى 9 تطوّرت كأشكالٍ اختزالية لمجموعة من الخطوط الصغيرة.

إن تطوُّرَ رموزِنَا الحاليَّةِ يُمكنُ أنْ يعودَ بنا إلى النصوص المكتوبة البراهميّة في الهند، وهي صيغٌ مبكِّرةٌ جدًّا من الكتابات الهندية وُجِدتْ في عباراتٍ منقوشةٍ خلّفها أسوكا Asoca، وهو الإمبراطور الثالث للعائلة الحاكمة في Mauryas of Magadha، التي حكمت في الهند من عام 273 إلى عام 235 ق. م (الشكل 10-1)، وتبدو العباراتُ المنقوشةُ وكأنّها مشتقةٌ من تقليدٍ ساميٍّ غربيٍّ عن طريق مجموعةٍ من الآراميِّين. وقد قُدّمتِ الأعدادُ أوّلَ مرَّةٍ إلى أوروبّا، التي لم تكن منفتحة في نهاية القرن العاشر تقريباً، بواسطة الراهب جيربرت أوف أوريلاك (1003-945) G. of Aurillac، الذي أصبح فيما بعد البابا سلفستر الثاني في سنة 1000، المهمة عددياً (نهاية القرن العاشر)، لكن المخيّبة للآمال. فقد أخفق الاندفاع الضعيف للتجديد، وذلك بسبب معارضة الدوائر المحافظة التي

الشكل 10-1. نشأت الأرقام، المسماة أرقاماً عربيةً، من رموزٍ هندية تعود إلى النصوص المكتوبة لطائفة البراهما، ثم إلى جذورٍ في التقليد الساميّ الغربيّ. ويُظهرُ السّطرُ العلويُّ أربعة أرقامٍ ترجع إلى القرن الثالث قبل الميلاد، وقد وُجدت مكتوبةً في مراسيم أسوكا المكتوبة بالبراهمية. ويبيّن السّطر الثاني أرقاماً من القرن الثالث بعد الميلاد، أُخذت من مصدرٍ في أوتار براديس Uttar Pradesh..

فضّلت التشبّث بتقاليد روما الكلاسيّة، برغم الضعف الشديد الذي كان يعانيه علم الحساب فيها. وكان أبكر ظهورٍ للأعداد هناك في كتاب Codex Vigilanus، الذي نسخه الراهب فيجيلا Vigila في دير ألبيدا Albeda بإسبانيا عام 976.

كانت كلمة zero (التي أخذت من الكلمة العربية صفر، أي فارغ)، والتي تُمَثَّلُ الآن بالشكل 0، تُكْتَبُ في الأصل نقطةً، ومازال العرب يكتبون الصّفر في هذه الأيام نقطةً. وقد زحف رمز اللانهاية ∞، مثل ذئبٍ في الليل، إلى حقل الأعداد. وكان أول استعمالٍ لها عام 1655 من قِبَلِ جون واليس J. Wallis (1616-1703)، المصاب بالأرق الدائم، أستاذ الرياضيات في أكسفورد، وأحد مؤسسي الجمعية الملكيّة، وذلك في كُرّاسته في القطوع المخروطيّة Tract on conic sections. وقد اختار هذا الرمز لوصف مُنْحنٍ يمكن أن يستمر بلا حدود، وربما كان ذلك يعبّر عن أملٍ لينالَ قسطاً من النوم.

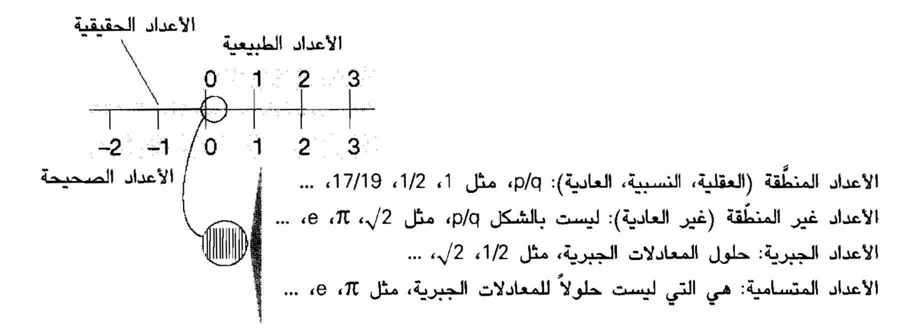


وقد بدأت المشكلات (هذه هي الرياضيات) حين وُحِّدتِ الأعدادُ بعدة طرائق. وحين نبدأ باستخدام الأعداد الطبيعية باستعمال عملياتٍ مثل الطرح والقسمة فإننا نولّد أنواعاً من الأعداد التي لها علاقات أقلّ بالكاردينالية (الأصلية). فنحن ننظر أولاً إلى الرمزيّة لهذه الاستخدامات، ثم نرى كيف ـ عندما نطبّقها على

الأعداد الطبيعية ـ نولّد أنواعاً جديدة من الأعداد؛ والنتيجةُ مُبَيَّنَةٌ باختصار في الشكل 10-2، وقد يكون ممّا يساعدنا أن نُبقِي هذا الشكلَ في ذاكرتنا بعد تقديمه. وفي الأوقات المبكّرة لعلم الرياضيات، كانت المعادلات «بلاغيَّةً»، بمعنى أنه كان يعبَّر عنها بطريقة معقّدة بواسطةِ الكلمات. وقد حدث وضوح أكبر عندما قُدّمتِ الرموزُ للدلالة على العملياتِ، وهذه الزيادة في الوضوح أدّت إلى زيادةٍ في قوة استعمالها.

إن إشارة الجمع + ربما اشتُقَّتْ من كلمة et عند كتابتها بخطٍّ متّصل، وكان أول ظهور لها في مخطوطاتٍ ألمانيةٍ ظهرت في القرن الخامس عشر؛ أما إشارة الطرح − فربما تشير، ببساطة، إلى الفصل. وربما كانت إشارة الضرب × مشتقةً من رمزٍ مستعملٍ في حسابات التناسب التي يرد فيها الضرب، وكان أول ظهور لها في clavis mathematicae الذي نشره عام 1631 وليام أوترد W. Oughtred (1660-1574)، وهو مخترعُ أوّلِ شكلٍ للمسطرةِ الحاسبة. وقد وجد الرياضيّ الألمانيّ غوتفريد لايبنتز (1716-1646) G. Leibnitz أنّ من السهل جدًّا الخلطَ بين الإشارة × والحرف x، لذا اقترح عام 1698 استعمالَ النقطة بدلاً من إشارة الضرب، فالعبارة a.b تعني a مضروباً في b. وقد حَبَّذَ أيضاً استعمالَ الرمز : للقسمة، لكن سبقه إلى استعمال الرمز العام ÷ (الذي كان مستعملاً سابقاً لعملية الطرح) للقسمة نصٌّ سويسريٌّ عام 1659.

أما إشارةُ المساواة =، المشكَّلَةُ من خطّيْن متوازييْن متساوييْن، فَقُدِّمَتْ في كتاب (1557) The whetstone of witte الذي ألفه الرياضي الإنكليزي روبرت ريكورد (1558-1510) R. Recorde، والذي قدّم علمَ الجبر إلى إنكلترا، والذي كسبَ بسرعةٍ كبيرةٍ الكثيرَ من الأموال من الكتب التي وضع لها عناوين جذابة (من ضمنها The Whetstone؛ The grounde of artes، مقدمة في علم الحساب؛ The castle of knowledge، كتاب في الفلك)، والذي، برغم كلّ ذلك، مات في السجن بسبب الديون المتراكمة عليه.



الشكل 2-10. نورد هنا خلاصةً للأنواع الرئيسية من الأعداد التي نقابلها في هذا الفصل. الأعداد الطبيعية هي أعداد العدّ؛ وحين توسيعها لتشتمل على القيم السالبة، فإنها تُعَمَّمُ لتصبح الأعدادَ الصحيحةَ. ويقع بين الأعداد الصحيحة الأعداد المنطَّقة (التي تسمى، أحياناً، العقلية، أو النسبية، أو العادية)، وهي الأعداد التي يمكن التعبير عنها بعدد طبيعي مقسوم على آخر. والأعداد الأكثر كثافة هي الأعداد غير المنطَّقة، التي لا يمكن التعبير عنها بالصيغ السابقة. وتتكوّن الأعداد الحقيقية من الأعداد الصحيحة، والأعداد المنطَّقة والأعداد غير المنطَّقة، وهي تقابل النقاطَ التي تكوّن خطًّا مستقيماً يمتدّ من اللانهاية في كلا الاتجاهين. الأعداد الجبرية هي أعداد يمكن الحصول عليها كحلولٍ للمعادلات الجبرية (انظر النص والحاشية 7)، والأعداد المتسامية هي الأعداد التي لا يمكن الحصول عليها كحلول للمعادلات الجبرية. بعض الأعداد الجبرية أعداد منطّقة. وبعضها غير منطّقة، وجميع الأعداد المتسامية غير منطّقة.

وقد دخلت إشارةُ المساواةِ = المألوفةُ حاليًّا، التي اقترحها ريكورد، معاركَ طويلةً مع الإشارة ، ومع تصميمات أخرى تستند إلى x، وهذا الرمز اختصار لكلمة aequalis، وذلك قبل انتصارها النهائي.

إن جمعَ الأعدادِ الطبيعيّةِ وضربَهَا يولِّدان أعداداً طبيعية من نفس النوع. فمثلاً 7 = 2+5، وهو عدد طبيعي؛ و10 = 2x5، وهو عدد 10 عدد طبيعي آخر. لكن الطرح يولّد صنفاً جديداً من الأعداد. وهكذا، إذا طرحنا 3 من 2، فإننا نجد -1، وهذا يوسِّعُ حقلَ أعدادنا من الطبيعية إلى الأعداد الصحيحة وهي ... ,2- ,1- ,0 ,1 ,2 ... ولا بد أنْ كانت الأعدادُ الصحيحةُ السالبةُ مذهلةً عند تقديمها، لأن الناس المعنيّين بالعدّ فقط وجدوا من الصعب تخيُّلَ مقاديرَ أقلَّ من لا شيء.

ومع أنّ عمليةَ ضربِ الأعدادِ الطبيعيةِ تؤدِّي إلى أعدادٍ طبيعيةٍ فقط، فإن

مفهوم الضرب يُؤدي إلى تحديد صنف جزئي subclass من الأعداد الطبيعية يُسمى الأعدادَ الأوليةَ، وهي أعداد ليست مضاعفات لأعداد طبيعية أخرى (باستثناء 1 والأعداد نفسها). وهكذا فإن الأعداد الأوليّة الأولى هي ,7 ,5 ,3 ,2 ... ,17 ,13 ,11، العدد 15، مثلاً، ليس أوّليًا لأن من الممكن التعبيرَ عنه بالشكل 3x5. وبالمقابل، فالعدد 17 أوّليٌّ لأنه لا يمكن التعبير عنه بحاصل ضرب عددين طبيعيين آخرين. كانت الأعدادُ الأوليةُ، وما تزالُ، مركزَ اهتمامٍ بالغٍ من قِبَلِ أولئك الذين تفتنهم الأعدادُ، لأنها تبدو وكأنها تسلك سلوكاً شبيهاً تماماً «بالذرّات» الأساسية للأعداد الطبيعية - إنها تقوم بدورِ أعدادٍ يمكن أن ننشىء منها جميع الأعداد الأخرى - عند النظر في عملية الضرب. هذه السِّمةُ الأساسيَّةُ هي المحتوى الأساسيُّ للمبرهنة الأساسية في علم الحساب التي أبدعها إقليدس، والتي تؤكّد أن كلَّ عددٍ طبيعيٍّ هو حاصلُ ضربٍ **وحيدٌ** لأعدادٍ أوّليّة[2]. إن عدداً مثل 811 365 9، مثلاً، يمكن التعبيرُ عنه بوصفه حاصلَ ضربِ أعدادٍ أوّليّةٍ بطريقةٍ وحيدةٍ (في هذه الحالة هو $3x7^2x13^3x29$). المبرهنة الأساسيّةُ هي أساسُ إجراءاتِ الترميزِ (التشفير) coding الحديثة، التي تستفيد من حواصل ضرب عددَيْن أوليّيْن كبيريْن، ودراسةُ الأعدادِ الأولية ليستْ مجرّد رياضياتٍ لامباليةٍ، إذ إنها مركزيّةٌ في سلوك التداولات الآمنة في التجارة، وفي الاتصالات الخاصة بين الأفراد والجيوش.

ثمة خاصّيّاتٌ متنوّعة معروفة للأعداد الأوّليّة، لكنْ مازال هناك بعضُ المُخَمَّنَاتِ conjectures لم يَجْرِ إثباتُها بَعْدُ (وقد تكون خاطئةً). إحدى هذه المخمّنات عرفها إقليدس، وتنصّ على وجود عددٍ غيرِ منتهٍ من الأعداد الأولية: فهذه الأعداد تستمرّ دون توقّفٍ. وأكبرُ عددٍ أوّليٍّ معروفٍ حاليًّا هو $2^{13466917} - 1$[3]. وهذا العدد مثال على عدد أوّليّ مَرْسِينِيٍّ Mersenne prime، وهو عددٌ أوّليٌّ من

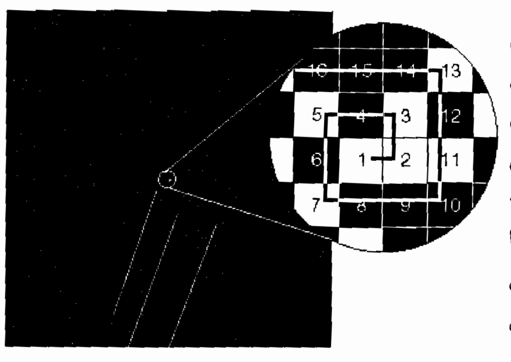
(2) لن تكون المبرهنة صحيحة إذا اعتُبر 1 عدداً أولياً، لأنه يمكننا أن نضم أي عدد من عوامل العدد 1 للحصول على نفس الجواب. وهذا أحد أسباب استثناء 1 من قائمة الأعداد الأولية، لكنه قد يزحف إليها بصفته عنصراً أوّليّاً مخزيًّا في بعض الحالات.

(3) إذا أردتَ أن تعرفَ أكبرَ عددٍ الآن (بعد تاريخ إصدار هذا الكتاب) فيمكنك الرجوع إلى الموقع: http://www.utm.edu/research/primes.

الشكل $2^p - 1$ حيث p نفسه عددٌ أوّليٌّ. اكتُشِفَ هذا العدد في 14 تشرين الثاني/نوفمبر عام 2001، وإذا أردنا كتابته كاملاً نجد أمامنا 4 ملايين رقم (والأدق هو 946 053 4)، وهذه الأرقام تملأ قرابة ثمانية كتبٍ بحجم هذا الكتاب. تسمى الأعداد الأوّليّة الكبيرة المؤلّفة من أكثر من ألف رقم، تيتانيّةً titanic. وكلما كبرت الأعدادُ الأولية زادتِ المسافاتُ بينها، لكنْ يوجَدُ دائماً عددٌ أوّليٌّ واحدٌ على الأقل، بين أيّ عددٍ طبيعيٍّ معطًى وضعف هذا العددِ، فمثلاً، يمكنك التوثُّق من أنه يوجد عدد أوّليّ، واحدٌ في الأقل، بين العددين بليون وبليونين؛ وفي الواقع يوجد بينهما ملايين من الأعداد الأولية. بعض الأعداد الأوّليّة تتكدّس معاً. فمثلاً، يوجَدُ كثيرٌ من «الأعداد الأوّليّة التوأميّةَ twin primes»، وهي أعدادٌ الفرقُ بينها 2، وهكذا فإن 11، 13 عددان أوّليّان توأميّان. وتنصْ مخمّنة الأعداد الأوّليّة التوأميّة twin prime conjecture (التي هي ليست سوى مخمّنة) على وجود عددٍ غيرِ منتهٍ من الأعداد الأوّليّة، ومن ثَمَّ فالأعدادُ الأوّليّةُ التوأميةُ، مثل الأعداد الأوّلية ذاتِهَا، غيرُ منتهيةً. وحتى الآن، فإن أكبرَ عدديْن أوّليّيْن توأميْن معروفيْن هما $33218925 \times 2^{196690} - 1$ وَ $33218925 \times 2^{169690} + 1$ (اكتُشِفَ هذا الزوج عام 2002، ولكلِّ عدد 51090 رقماً).

يوجد الكثير من الخاصّيّات العجيبة الأخرى للأعداد الأوّليّة. فمثلاً، اكتشف الرياضيُّ ذو الخيال الواسع على نحو استثنائيٍّ، الأمريكيُّ من أصلٍ بولونيٍّ، ستانسلاف أولام (1984-1909) S. Ulam، أنّكَ لو كتبتَ كلَّ الأعداد الأوّليّة على حلزونٍ (لولب)، حيث العدد 1 في المركز، والعدد 2 إلى يمينه، والعدد 3 فوق 2، والعدد 4 فوق 1، والعدد 5 إلى يسار 4، وهكذا، وعَلَّمْتَ جميعَ الأعداد الأوّليّة، فإنها تميل إلى الاصطفاف في خطوطٍ قطريّةٍ (الشكل 10-3). وقد استعمل أولام هذا التصوّرَ بطرائق أخرى: واستطاع مع إدوارد تِلَرْ E. Teller أن يكتشف أيضاً كيف يَسْتَهِلُّ انفجارَ قنبلةٍ هيدروجينيةٍ.

ومع أنّ الأعدادَ الأوليّة هي الذّرّات الأساسيّة للضرب (تماماً كما يكون العدد 1 الذرة الأساسيّةَ للجمع)، **فربما** تؤدي أيضاً دوراً أساسيًّا في عملية



الشكل 3-10. لولب أولام. عند تحديد مواقع الأعداد الطبيعية في لولب، كما هو مبيَّن في الشكل، وتحديد مواقع الأعداد الأولية، فإن الأعداد الأولية تميل إلى الاصطفاف على خطوط قطرية، كما يرى عند فحص المنطقة البيضاء، التي تكون الأعداد الأولية فيها شبيهة بنجوم بيضاء. لقد رسمنا بعض الأقطار للدلالة على موقعها، ويجب أن تكون قادراً على تمييز أعدادٍ أخرى أيضاً.

الجمع أيضاً. ففي عام 1742، اقترح كريستيان غولدباخ C.Goldbach ـ الذي كان، في وقت من الأوقات، معلِّماً للقيصر بطرس الثاني ـ في رسالةٍ بعث بها إلى الرياضي السويسري الذائع الصيت ليونارد أولر (1783-1707) L. Euler أنّ كلَّ عددٍ طبيعيٍّ زوجيٍّ أكبرَ من 2 هو مجموعُ عدديْن أوّليَّيْن. وهكذا فإن ... ,100= 47++53 ,... 2+2=4 , 6 = 3 + 3 ,3+5=8. وهذا الاقتراح، الذي يسمى مُخَمَّنَةَ غولدباخ Goldbach's conjecture، لم يجر إثباته حتى الآن، برغم الجهود المضنيةِ التي بُذِلَتْ لحلِّ هذه المخمّنة. ويبدو أن الصعوبةَ ناشئةٌ من أنّ الأعدادَ الأوّليَّةَ تنبثق من مفهوم الضرب، لكنها تُقْحَمُ هنا في سياق عملية الجمع. بَيْدَ أنّ المخمَّنة قد تكون مثالاً على سمةٍ تتحرك تدريجياً باتجاه ما نريد قوله: فقد لا يوجد برهان عليها، ومن ثَمَّ، فإن المخمّنةَ بمعنًى من المعاني، قد تكون لا صحيحةً ولا خاطئةً. وقد خَمَّنَ غولدباخ، أيضاً، أنّ أيَّ عددٍ طبيعيٍّ فردي هو مجموع ثلاثة أعداد أوّليّةٍ. وقد جرى إثبات هذه المخمّنة جزئيًّا ـ وهذا البرهان صالحٌ للأعداد الكبيرة فقط ـ من قِبَلِ الرياضيِّ الروسيِّ إيڤان مَاتْڤِيِيڤِيتْش، ڤينوغرادوف (1983-1891) I.M. Vinogradov، وذلك عام 1937.

هذا وإن قسمة عدد طبيعيٍّ على آخر تقدِّم أيضاً صنفاً جديداً من الأعداد، تسمى الأعداد المنطَّقةَ (أو العقلية، أو النسبية، أو العادية) rational numbers (جاءت كلمة rational من ratio؛ أو ربما كان سبب استعمالنا مصطلحَ

«rational» لهذه الأعداد، هو أنها تستند إلى العقل)؛ وكأمثلة على هذه الأعداد الواقعة بين 0 و 1 نجد: ...0.500 000 000 =1/2، والعدد = 3/7 ...0.428 571 428 57. لاحظ كيف تتعاقب الأرقامُ العشريةُ في الأعداد المنطَّقة، فإما أن يتكرر 0 دون توقف، أو أن نجد متتاليةً منتهية من الأعداد تتكرّر إلى ما شاء اللَّه.

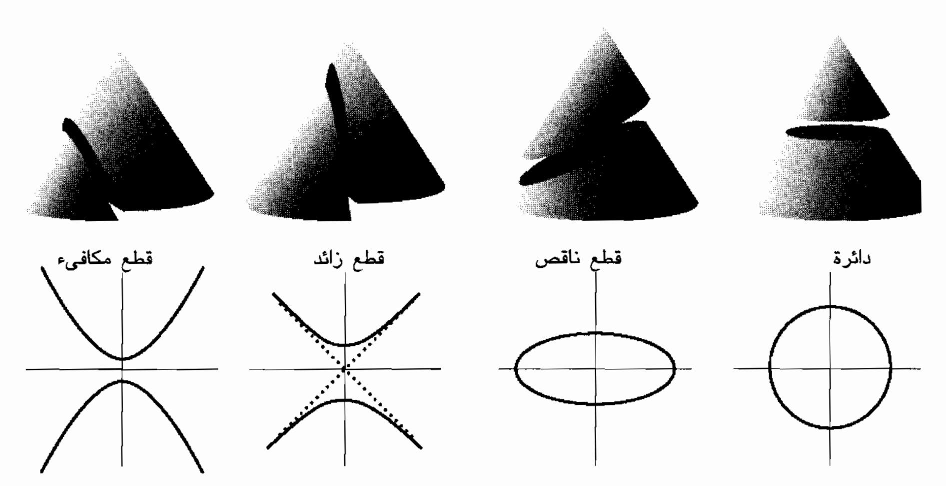
إذا بدأْتَ تفكّر كرياضيٍّ، وهو شخصٌ يتجاوز الأشياءَ المباشرةَ، ويبحثُ عن تعميماتٍ، ويستكشفُ إلى أين تقودنا، عندئذٍ ستشعر أنّ ثَمَّةَ سؤالاً يدور في خَلَدِهِ، وهو: هل ثمة أعدادٌ لا تحتوي على متتالياتٍ متكرّرة، ومن ثَمّ لا يمكن التعبير عنها بصيغةِ نسبةِ عددَيْنِ طبيعيَّيْن؟ كان أوّلَ من اكتشفَ وجودَ هذهِ الأعداد غير المنطّقة irrational numbers هم الفيثاغوريّون، الذين برزت فلسفتهم الكلِّيَّةُ في الحياة في Croton (المدينة الواقعة في كعب إيطاليا، التي تُسمَّى الآن Crotone). كانت فلسفتهم مستندةً إلى وجود الانسجامات بين الأعداد المنطّقة، وعدم التبوّل نحو الشمس، وتقليم الأظافر عند تقديم الأضاحي، والحفاظ على التعايش الاجتماعيّ السلميّ بالابتعاد عن أكل الفاصوليا (وهذا ما تعلّمه فيثاغورس نفسُهُ من كهنة المصريين الذين عاش في وقت من الأوقات بينهم)[4]، لكنهم نبذوا كل هذا عندما اكتُشِفَ أنّ الجذر التربيعيَّ للعدد 2، وهو $\sqrt{2}$ يساوي ...1.414 213 5، وهو عددٌ غيرُ منطَّقٍ irrational، ولا يمكن التعبير عنه بقسمة عددٍ طبيعيٍّ على آخر. ومنذ ذلك الحين، جرى تعرّفُ قدْرٍ كبيرٍ من الأعداد غير المنطّقة، من ضمنها ...$\pi = 3.141\ 59$ (نسبة محيط دائرة إلى قطرها، وقد جرى اعتمادُ الرّمزِ π من قِبَلِ أولر عام 1737، وثبت أنه غيرُ منطّقٍ فعلاً عام 1767)[5]، ومن ضمن الأعداد غيرَ المنطّقة العدد π^2 أيضاً (الذي جرى البرهان على أنه غير منطّق عام 1794)، والعدد ...$e = 2.718\ 28$ (أساس اللغاريتمات

(4) لقد كان مصيباً تماماً. فنحن نعرف الآن أن الفاصوليا غنية بالكربوهيدرات التي لا يمكن لخمائرنا هضمها، لكن يمكن هضمها في أمعائنا، وعندئذٍ تطلقُ كمياتٍ كبيرةً من ثنائي أكسيد الكربون والهيدروجين، وهذا سبب رئيسي لتطبُّل البطن.

(5) جرى حساب قيمة π وصولاً إلى عدة آلاف من الأرقام. ويبدأ الرقم 7 بالتكرار بعد 1589 رقماً، ويتكرر أربع مرات، لكنْ تظهر أرقام مختلفة بعد ذلك.

الطبيعية). ومن الصعب إثبات أن عدداً ما غيرُ منطَّقٍ: فمثلاً، مع أن من المعلوم أن e غير منطَّق، فما زلنا نجهل ما إذا كان e كذلك.

تسمى الأعدادُ المنطَّقةُ وغير المنطَّقةِ، الموجبةُ والسالبةُ، ومن ضمنها الصفر، الأعداد الحقيقيّةَ real numbers. ولتصوُّرِ الأعدادِ الحقيقية، من الممكن التفكير في كلِّ عددٍ بأنه ممثَّل بنقطةٍ على خطٍّ مستقيمٍ، بحيث يتعاظم كبر الأعداد باتجاهنا يميناً على الخطّ. إن الأعداد الحقيقية، كالنقاط على هذا الخط المستقيم، تمتدّ من ناقصِ لانهايةٍ من اليسار، إلى زائدِ لانهايةٍ في اليمين، وهي تحتوي على كلِّ الأعدادِ الممكنةِ ـ الصحيحةِ، والمنطَّقةِ، وغيرِ المنطَّقةِ. إنّ ربط الأعداد الحقيقية بنقاطٍ على خطٍّ مستقيم هو خطوة حاسمة في تَعَرُّفِ أنّ الهندسةَ ـ خاصيّات الخطوط المختلفة، ومن ثَمّ مجموعات النقط، ومن ثَمَّ مجموعات الأعداد الحقيقية ـ يمكن أن تعالَجَ بوصفها فرعاً من علم الحساب، لن نسلكَ هذا الطريقَ في هذا الفصل، بيد أنه يتعين عليك أن تعرفَ أنه على الرغم من أننا سنركّزُ على أفكارٍ حسابيّةٍ، فإنها تتضمّن خِفْيَةً فروعاً أخرى أيضاً من الرياضيات، مثل الهندسة (الشكل 10-4). وفي الحقيقة فإن مجال الحساب أوسع كثيراً. ووفقاً لمبرهنةٍ استثنائيّةٍ، لكنْ جذّابة، كان أول من أثبتها الرياضي الألماني ليوبولد لُوِيْنهايْمْ (1957-1878) L. Löwenheim عام 1915، وقام بتحسينها العالِمُ النروجيُّ ألبرتْ تُورافْ سكوليم (1963-1887) A.T. Skolem عام 1902، فإن نظاماً من القواعد، كقواعد علم الحساب، يمكن بناؤه على مجموعة من المسلّماتِ (البديهيات) axioms. وربما يكون قد خفّ بعضُ الضَّجَر في تعلُّم كيفية استخراج الجذور التربيعية وإجراءِ عملياتِ القسمةِ الطويلة لو أنهم أخبروك في المدرسة أنه وفقاً لمبرهنة لوينهايم ـ سكوليم فإنك في الواقع تُنَمْذِجُ عمليّةَ استخلاصِ نتائجَ من الميكانيك الكوانتيّ (الكمومي)، والانتقاء الطبيعي، والقانون (هذه الفروع المعرفيّة، التي ذكرناها حتى الآن، يمكن التعبير عنها اعتماداً على المسلمات). ويصح الشيء نفسه على بقية الفصل: فمع أن قسماً كبيراً منه سيقَدَّمُ كوصفٍ لعلم الحساب، فلا يَغِيبَنَّ عن بالنا أنه حقيقةً وصفٌ لأيّ فرع



الشكل 10-4. كان لدى اليونان تصوّرٌ مثاليٌّ للفضاء، ومن ثم كانوا متميزين في علم الهندسة. ونرى هنا كيف أنّ من الممكن اعتبارَ القطوعِ المكافئة والزائدةِ والناقصةِ (ومن ضمنها الحالة الخاصة للدائرة) اختياراً لأعدادٍ نحصل عليها بقطعِ مخروطٍ باتجاهاتٍ مختلفة. ونحن نعرف الآن - والفضل في ذلك يعود، في المقام الأول، إلى ديكارت - كيف يمكن ربط هذه الأشكالِ بمقاديرَ جبريَّةٍ، وهكذا يمكّننا أن نرى الآن الرابطةَ بين هندسة الفضاء والخاصيات الحسابية لخيارات معينة للأعداد.

منهجيٍّ للمعرفة الإنسانية[6]. وإذا لم يكن هذا شيئاً مثيراً، فلا أعلم عندئذٍ ما هو المثير.

بعض الأعداد غير المنطّقة، ومنها π، ولكنْ ليس $\sqrt{2}$، هي متسامية transcendental، بمعنى أنها «تسمو فوق» المعادلات الجبرية العادية. وهذا يعني، ببساطة، أنها ليست حلولاً لمعادلاتٍ جبريةٍ بسيطةٍ مثل $3x^3 - 5x + 7 = 0$[7]. وهكذا فإن $x = \pi$، حلٌّ للمعادلة $x^2 - 2 = 0$، ومن ثم فهو جبريٌّ، لكنْ ليس متسامياً. ولا وجود لمعادلة من هذا النوع لها حل من الشكل $x = \pi$، أو $x = e$، لذا فإن π، e ليسا غير منطَّقين فحسب، بل إنهما متساميان أيضاً. وفي عام 1934، أثبت الرياضي الروسيّ ألكساندر غلْفَانْد A. Gelfand (1906-1968) أن a^b عددٌ متسامٍ

(6) المقابل، الذي ينص على أن جميع الأنظمة المعرفيّة هي مجرّد علم الحساب، صحيحٌ أيضاً، وربما كان أكثر رصانةً.

(7) تتخذ المعادلة الجبرية الصيغة $a_n = 0 \; ... \; a_{n_1}x^{n^1} \; a_n x^n$، حيث a_n أعداد صحيحة.

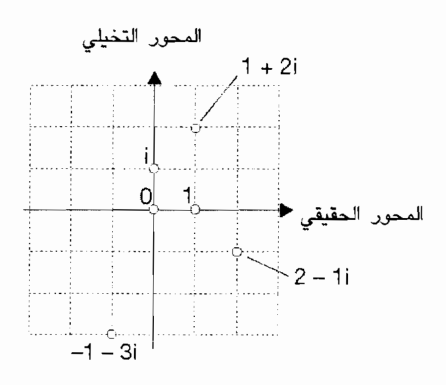
عندما يكون a جبرياً (غير الصفر و 1) و b عدداً جبريًّا وغيرَ منطَّقٍ (مثل π)، وهكذا فإن $2^{\sqrt{2}}$، مثلاً، متسامٍ لأن 2 عدد جبري، والعددَ غيرَ المنَطّق $\sqrt{2}$ جبريٌّ: لذا فنحن نَعْلَمُ، حالاً، إذن، أنْ لا وجودَ لمعادلةٍ جبرية حلها $2^{\sqrt{2}}$. هذا وإنّ الاسمَ «algebra»، مشتقٌّ من الجبر والمقابلة، وهذا عنوانُ كتابٍ ألّفه محمد بن موسى الخوارزميّ عام 830 وإن كلمة الجبر معنيّة بحل المعادلات. وقد ورد اسم الخوارزميّ مرتيْن، أُولاها بوصفه مؤلِّفاً لهذا الكتاب، والثانيةُ في مصطلحنا «algoritm» (الخوارزميّة)، وهي سلسلةٌ من القواعد الإجرائية لحلّ المعادلاتِ.

لقد رأينا أنّ حلولَ المعادلاتِ المختلفةِ أسفرتْ عن نشوء صُنُوفٍ معطاةٍ للأعداد، وتسمّى، عموماً، «أعداداً جبرية». إن حلول معادلاتٍ مثل $2x = 1$ تعطينا أعداداً منطَّقةً (الحل في هذه الحالة هو $x = 1/2$)، في حين تعطينا معادلاتٌ مثل $x^2 = 2$ أعداداً غيرَ منطَّقةٍ (الحل في هذه الحالة $x = \sqrt{2}$)؛ والأعدادُ التي ليست حلولاً لمعادلاتٍ بسيطةٍ كهاتين المعادلتيْن هي أعداد متساميةٌ (مثل العدد $x=2^{\sqrt{2}}$). ويمكن تصوّرُ الأعدادِ الطبيعيةِ بوصفها حلولاً لمعادلاتٍ، مثل $x=\sqrt{2} = 1$ (التي حلها $x = 3$)، والأعدادِ السالبةِ بوصفها حلولاً لمعادلاتٍ مثل $x + 2 = 1$ (التي حلها $x = -1$). لكنْ ثمّة معادلةٌ بسيطةٌ غابتْ عن هذه القائمة: فما هو حل المعادلة $x^2+1= 0$؟ لا يمثل أيٌّ من الأعداد التي قدّمناها حتى الآن حلاًّ، لأنّ مربّع أيٍّ منها عدد موجب، وعندما يضاف إليه 1، فلا يمكن أن تكون النتيجة 0. ولما كان الرياضيون، عموماً، لا يريدون الاعترافَ بأنه لا يوجد حلولٌ لبعض المعادلات، فقد ابتكروا مفهوم **العدد التخيّليّ** imaginary number i، الذي هو حل المعادلة $x2 + 1 = 0$ أي بمعنى آخر $i = \sqrt{-1}$). ولأنهم ـ في الحقيقة، لأن ديكارت ـ ظنوا أن العددَ i، وأيَّ مضاعفٍ له، غيرُ موجودٍ، فقد أطلقوا عليه اسم العدد «التخيليّ».

وسرعان ما اتّضح أن لبعض المعادلات، مثل المعادلة $x^2-x+1= 0$، حلولاً مؤلّفةً من أعدادٍ حقيقيةٍ وتخيّليّةٍ، وهي في هذه المعادلة $x =1/2+(1/2 \sqrt{3})i$ وَ $x =1/2-(1/2 \sqrt{3})i$. تسمّى هذه الأعدادُ **أعداداً عقديةً** complex numbers. وفي مثالنا، الحلُّ الأوّلُ مؤلّفٌ من عدد «حقيقي» هو 1/2، ومن عدد تخيّليٍّ

هو: $(1/2 \sqrt{3})i+$، والحل الثاني مؤلف من العدد الحقيقي 1/2، ومن العدد التخيلي: $(1/2 \sqrt{3})i-$. أو لا بد من وجود قواعد خاصة يجب تحديدها لإجراء الحسابات على هذا النوع من الأعداد المركَّبة من قسمٍ حقيقيٍّ وآخرَ تخيّليٍّ، لكنها تحديدات طبيعية للقواعد التي نستعملها في الأعداد الحقيقية، ومن ثَمّ فإنها لن تولّد صعوبةً خاصة.

يمكن ترتيب الأعداد الحقيقية في خطٍّ مستقيم، كما سبق ورأينا. ويمكن أن تصبحَ الأعدادُ العقديّةُ أقلَّ غموضاً حالما ندركُ أنّ من الممكن تمثيلَ كلٍّ منها بنقطةٍ في مستوٍ، حيث يُشار إلى القسم الحقيقيّ من ذلك العدد بمسافةٍ على المحور الأفقي، وإلى القسم التخيّليّ بمسافةٍ على المحور الرأسيّ (الشكل 5.10). وبعبارة أخرى، فإن العددَ العقديَّ هو في الواقع زوجٌ من الأعداد: فمثلاً، العدد 1+2i هو، ببساطة، العددُ ذو المركّبتين (1,2)، الذي يمكن تمثيله بنقطة تبعد 1 سم من المحور الرأسي وَ2 سم عن المحور الأفقي. ويمكننا التفكير في عددٍ عقديٍّ بأنه أحدُ أحجار الدومينو، حيث تكون القيمةُ في الظّرف الأيسر من المستطيل مقابلةً للقسم الحقيقي، وتكون القيمةُ في الطرف الأيمن القسمَ التخيليَّ. وفي المستقبل عندما تأخذُ حجرَ الدومينو ، فَكِّرْ في أنه العددُ العقديُّ 4+3i. وإذا



الشكل 5-10. العدد العقديّ هو عددٌ ذو مركّبتيْن، ومن الممكن تمثيله بنقطةٍ في المستوين، فالعدد العقديّ 2-1i يمثّل بوحدتيْن على المحور الأفقي، ووحدةٍ واحدةٍ على المحور الرأسي. ومعالجات الأعداد العقدية هي ببساطة، معالجاتٌ لهاتين المركّبَتَيْن.

لم تشعر بارتياحٍ مع أشكالٍ من هذا النوع، لا تقلقْ: فلن تَرِدَ الأعدادُ التخيليّة مرّة أخرى في هذا الفصل، إلاّ في ملاحظة عابرةٍ سريعةٍ.

في هذا الفصل، سأتناول سؤاليْن مباشريْن إلى حدٍّ ما: ما هي كمّيّة الأعداد الموجودة، وما هي هذه الأعداد على كل حال؟ وكما قد تتوقّعُ، فإن الجوابَ سيكون أعقدَ من السؤاليْن.

تبيّن نظرةٌ عجلى أنّ ثَمَّةَ عدداً غيرَ منتهٍ من الأعداد الطبيعية، لأننا، من وجهة المبدأ، يمكن أن نتابعَ العدْ إلى الأبد. ونعبِّر عن هذا بقولنا إنّ «كاردينالية» الأعداد الطبيعية غير منتهية. وفندق هلبرت Hilbert's hotel استكشافٌ رائع لهذه الكاردينالية، وهو يُعزَى إلى الرياضي الألماني ديفيد هلبرت D. Hilbert، الذي سنقابله بجدِّيَّةٍ ثانيةً في وقتٍ لاحقٍ. فندق هلبرت مؤلّف من عددٍ غيرِ منتهٍ من الغرف، وفي إحدى الليالي تكون جميعُ الغرف مسكونةً. يصل مسافرق دون حجزٍ سابقٍ. عندئذٍ يصرخ هلبرت (المدير) قائلاً: «لا يوجد مشكلة!»: إذ يُقنِعُ جميعَ النزلاء بأن ينتقل كلٌّ منهم إلى الغرفة المجاورة، تاركاً الغرفة الأولى شاغرةً، وبهذا يستطيعُ استيعابَ الضيف الجديد. وفي وقتٍ متأخر من تلك الليلة، يأتي عددٌ غير منتهٍ من المسافرين، دون حجز سابق. وعندئذٍ يصرخ هلبرت ثانيةً: «لا يوجد مشكلة!»، ويقوم بإقناع **جميع** الضيوف بالانتقال إلى غرف أرقامها ضعف أرقام الغرف التي نزلوا فيها، وبهذا يتركون الغرف ذات الأرقام الفردية خالية، وبذلك يوفر غرفاً لجميع القادمين.

قد تكون الأمور حتى الآن على ما يرام. ولكن ما الذي يمكن قوله عن الأعداد المنطَّقة، وهي التي يمكن الحصول عليها قِسْمةِ عددٍ طبيعيٍّ على آخر: فما هو عدد عناصر مجموعة تلك الأعداد؟ الجواب الواضح هو أنه يوجد من الأعداد المنطّقة أكثرُ ممّا هو موجودٌ من الأعداد الطبيعية، لأن ثمة عدداً كبيراً جدًّا منها يقع بين 0 و1 (مثلاً: 1/4، 1/2، 53/67، وغيرها كثير)، ويوجد قدر

	1	2	3	4
1	1	2	3	4
2	1/2	1	3/2	2
3	1/3	2/3	1	4/3
4	1/4	1/2	3/4	1
5	1/5	2/5	3/5	4/5
6	1/6	1/3	1/2	2/3

الشكل 10-6. يمكن وضع الأعداد المنطّقة في تقابلٍ مع الأعداد الطبيعية، ومن ثَمّ فإنها عَدُودة denumerable (قابلة للعدّ countable). يَرِدُ في السطر العلوي الأعداد التي تظهر في صورة (بسط) النسبة p/q، أما الأعداد الطبيعية الموجودة في العمود الأيسر، فتظهر في المخارج (المقامات). وحينما نتحرك على خط الأقطار المتعرج، فيمكننا عدّ جميع الأعداد المنطّقة (ومن ضمنها بعض الأعداد المكرّرة).

ضخم من هذه الأعداد بين 1، 2 (مثلاً: 3/2، 5/3، 79/47، وغيرها كثير)، وهلم جرًّا. ومع ذلك فالجواب الطريف الصحيح هو أنّ للأعداد الطبيعية نفسَ عددِ الأعدادِ المنطَّقة: فلهما نفس الكاردينالية، ونفس اللانهاية التي للأعداد الطبيعية.

لنرى أن هذا صحيح دعونا ننظر إلى الشكل 10-6، حيث رَسَمْتُ طاولةً تضمّ جميعَ الأعداد المنطّقة (لكن لا يظهر إلاّ جزء صغير جدًّا منها). وعلى طول القسم العلوي نجد الأعداد الطبيعية، التي تظهر في صورةِ (بَسْطِ) الكسور التي سنولّدها، ونجد في أقصى يسار الشكل الأعدادَ الصحيحةَ التي تظهر في مَخْرَجِ (مقام) تلك الكسور. وتحوي المنضدةُ جميع الكسور الممكنة التي تنتج من قسمة عدد طبيعيٍّ على آخر. سنجد عدداً كبيراً من الأعداد المكررة، مثل 3/6 و4/8، التي كلٌّ منها يساوي 1/2، لكنّ هذا غير مهم. يمكننا الآن رسم خط متعرّج يمر بجميع الكسور كما هو مبيّن في الشكل. بعد ذلك سنسير وفق هذا الخط، ونعدّ 1، 2، ... لكل كسر نقابله. وبهذه الطريقة، نجد أن جميع الكسور - جميع الأعداد المنطّقة - يمكن وضعها في مقابلةٍ أحاديةٍ (واحد إلى واحد) one-to-one correspondence مع الأعداد الطبيعية. لن تَنْفَدَ الأعدادُ الطبيعيةُ أبداً، ومن ثَمَّ فعدد الأعداد المنطّقة هو نفس عدد الأعداد الطبيعية، مع أنها أكثف من الأعداد الطبيعية. ثمة عددٌ غيرُ منتهٍ من الأعداد المنطَّقة بين 0 وَ 1 وبين 1 وَ 2. لكن لها نفس اللانهاية بين 0 وَ 2! واختصاراً، يمكننا دوماً عدّ الأعداد المنطّقة -

ونقول عنها إنها **عَدُودَةٌ (قابلة للعدّ)** denumerable ـ ونحصل على الجواب «لانهاية» بقطع النظر عن مدى الأعداد التي نجري فيه العدَّ. وربما بدأْتَ برؤية أنّ اللانهاية مفهومٌ مراوغٌ وغامضٌ.

الأعدادُ الجبريّةُ ـ وهي حلولُ لمعادلاتِ الجبريةِ ـ عَدُودَةٌ أيضاً. ويمكنكَ إلقاء نظرةٍ عجلى عليها بملاحظة أنّ كلَّ معادلةٍ جبريةٍ مؤلفةٌ من قوًى لِـ x (عبارات مثل x^2) مضروبةٍ بأعدادٍ صحيحةٍ (كما في المعادلة $4x^3 + +2x-1 = 0$). لذا ثمة مقابلةٌ أحادية (واحد إلى واحد) بين حلول هذه المعادلات ـ الأعداد الجبرية ـ وبين الأعداد الصحيحة التي تحدّدُ تلك المعادلات. وإذا احتفظنا بهذه المقابلة في ذاكرتنا، فيُحْتَمَلُ أن تقبَل بأنّ الحلولَ ـ الأعداد الجبرية ـ يمكن وضعها في مقابلة واحد إلى واحد مع الأعداد الطبيعية. ويمكننا أن نستخلص أنّ الأعدادَ الجبريّةَ قابلةٌ للعدّ؛ ومع أنها غيرُ منتهيةٍ، فإن لها نفسَ كاردياليّةِ الأعدادِ الطبيعيّةِ.

تُرى، ما هو عدد الأعداد غير المنطَّقة، وهي تلك التي لا يمكن التعبير عن كلٍّ منها بنسبة عددين طبيعيَّيْن؟ ربما تظنُّ أن ثمة عدداً غير منتهٍ منها. قد تكون على حقٍّ. لكنْ ما قد تكون مخطئاً فيه (ما لم تكن تعرف الجواب) هو أن ثمة لانهايةً للأعداد غيرِ المنطَّقة أكبرَ من لانهايةِ الأعدادِ الطبيعيةِ، أيْ أن للأعداد غير المنطّقة كاردينياليةً أكبرَ من كاردينياليةِ الأعداد الطبيعيةِ. إنّ المناقشة الذكية، التي بيّنت أوّلَ مرةٍ هذه السّمةَ الشاذّةَ، قدّمها مواطنٌ عالميٌّ اسمه جورج فرديناند لودفيك فيليب كانتور (1918-1854) G. F. L. P. Cantor، الذي والداه من الدانمرك ومن روسيا، والذي وُلِدَ في سان بطرسبورغ، وعاش معظم حياته في ألمانيا. كانت حياتُه مليئةً بالإحباطات، ذلك أنه كان يلقَى معارضاتٍ عندما كان يتناول موضوع اللانهاية، فقد كان يعاني تواتراتٍ نتيجةَ معارضةٍ من قِبَلِ أكثرِ الرياضيينَ محافظةً في ذلك الوقت، وبخاصةٍ ليوبولد كْرُونِكَرْ L. Kronecker (1891-1823) الذي كان يحظى بتأثيرٍ واسعٍ في الأوساط الرياضية، والذي كان يتحامل على جميع تنوّعات الأعداد باستثناء الأعداد المنطَّقة. وقد بدأ كانتور يعاني اضطراباتٍ عقليةً شديدةً، وهذا دفعه إلى اللجوء إلى الدِّين، لأنه اعتبر أن

المجموعات غير المنتهية من الأشياء التي درسها كانت موجودةً بوصفها كياناتٍ ضمن العقل الإلهيّ، وأنه ـ أي كانتور ـ كان الواسطةَ التي اختارها اللَّهُ لإظهارها. وقد استحوذت عليه فكرةٌ مفادها أن بيكون Bacon هو الذي كان يكتب لشكسبير، ثم أمضى مُدَداً متزايدةً من حياته في مصحّاتِ الأمراض العقليّةِ، حيث كان يستكشف حدودَ الدين، تماماً مثلما كان يستكشف حدود الرياضيات. الجنون، بالطبع، هو مجازفة عندما يتأمل المرء في لُجَّةِ اللانهاية، وقد تدركُ ذلك مع متابعتنا لهذا الفصل.

في عام 1874 اكتشفَ كانتور حجّةً بسيطةً ليُثبتَ أن الأعداد غيرَ المنطَّقة أغزر من الأعداد المنطَّقة. سنستعمل حجّته، وصِيَغاً أخرى لها ثانيةً، في سياقاتٍ أخرى، لذا فيجدر بِنا التوقُّفُ بعضَ الوقت عندها. ونستهلُّ هذا بكتابةِ قائمةٍ من أعدادٍ مختارة عشوائيًّا تقع بين 0 وَ 1، ونعدّها بالتتابع (في العمود الأيسر):

1	0.**1**98 402 957 820 . . .
2	0.4**3**8 291 057 381 . . .
3	0.68**4** 930 175 839 . . .
4	0.782 **9**48 261 859 . . .
5	0.500 0**0**0 000 000 . . .
6	0.483 91**3** 562 785 . . .
⋮	. . .

سنبين الآن أنهما مهما طالت القائمة، حتى لو أصبح طولها لانهائياً، فهناك أعداد لا توجد فيها. لفعل ذلك، ننشىء عدداً جديداً باختيار رقمه الأول من القسم العشري من العدد الأول، والرقم الثاني من القسم العشري من العدد الثاني، وهكذا، ثم نكتب رقماً **مختلفاً** في كل حالة: فتغيير الأرقام السميكة، مثلاً، يعطينا

العدد الجديد ...047 0.350. هذا العدد ليس موجوداً حتماً في القائمة الأصلية، لأنه يختلف عن العدد الأول، ويختلف عن العدد الثاني، وهكذا. يترتب على هذا أن الأعدادَ الحقيقيةَ (المنطّق وغير المنطَّق معاً) أكثرُ عدداً من الأعداد الطبيعية، لأنه مهما طالت القائمة، فيمكننا دوماً إنشاء عدد غير موجود فيها. لذا نقول إن الأعدادَ الحقيقيةَ **غيرُ عَدُودَةٍ**، أو **غيرُ قابلةٍ للعدِّ** uncountable.

لننظر في هذه النتيجة من مسافةٍ أقرب قليلاً. لقد رأينا لتوّنا أن الأعدادَ **الحقيقيةَ** (الأعداد الطبيعية + الأعداد المنطَّقة + الأعداد غير المنطّقة) غيرُ عدودةٍ. بيد أننا رأينا أن الأعداد الطبيعية، والأعداد المنطّقة، والأعداد الجبرية، عدودةٌ جميعها. الأعداد المستثناة من هذه الأنواع العدودة هي الأعداد المتسامية. لذا علينا الاستنتاج أنّ الأعدادَ التي تجعلُ الأعدادَ الحقيقيَةَ غيرَ عدودةٍ متساميةٌ كلُّها (مثل العددين π وَ e).

لنتوقف قليلاً ونفكر في أهمية هذه النتيجة الاستثنائية، إنها تعني أن الأغلبيةَ الساحقةَ من الأعداد متساميةٌ. قد يكون هذا أمراً مذهلاً، وبخاصة لأن الأعدادَ المتساميةَ أقلُّ أُلفةً وشيوعاً من الأعداد «العادية». وفي الحقيقة، ربّما لم يسبق لكَ أن سمعتَ بها من قبل. إن حقيقة كوْن الأعداد المتسامية أكثرُ بما لا يمكن وصفه من الأنواع الأخرى من الأعداد، هي أساسُ ملاحظتِي التي أوردتُها في مستَهَلِّ هذا الفصل، والتي مفادها أنّ من المفاجئ أن نستطيع العدّ: فالأعداد الطبيعية موزّعة بكثافةٍ جدٍّ قليلةٍ بين الأعداد الحقيقية، إذ إن كلاً منها محاطٌ بعددٍ غيرِ منتهٍ من الأعداد المتسامية. وقد عبّر المؤلِّفُ إدوارد تِمْبِلْ E. Temple عن ذلك بيانيًّا إذ قال:

الأعداد الجبرية [ومن ضمنها الأعداد الطبيعية] موزعة على المستوى كالنجوم في سماء مظلمة؛ والسواد الكثيف هو الأعداد المتسامية[8].

أشار كانتور إلى كاردينالية ـ العدد الكلي ـ للأعداد الطبيعية بالرمز العبريّ

(8) وردت هذه العبارةُ في كتاب تمبل الذي عنوانه Men of mathematics الذي نُشِرَ عام 1937.

$\aleph_0$ (أَلِفْ صِفْر)، وهو الأول في سلسلة الأعداد ما وراء المنتهية transfinite numbers $\aleph_0, \aleph_1, \aleph_2, ...$ ذات الأحجام المتزايدة[9]. ويمكننا التفكير في $\aleph_0$ بأنها أصغر نمط من اللانهاية، وأن x_1 هي النمط الأكبر التالي، وهكذا. لكن المشكلة التي واجهت كانتور هي ما إذا كانت كاردينالِيَّة الأعدادِ الحقيقةِ، التي رأينا أنها أكبر من كاردينالية الأعداد الطبيعية، مساويةً $\aleph_1$، أو عدداً ماوراء منتهٍ أعلى. إن فرضية الاتصال continuu hypothesis الشهيرة تنص على أن كاردينالية الأعداد الحقيقية ـ عدد نقاط الخط المستقيم ـ تساوي $\aleph_1$، وهي أول الأعداد الكاردينالية بعد $\aleph_0$، ولا تساوي، مثلاً، $\aleph_5$، أو عدداً ما وراء منتهٍ آخر. وما دفع بكانتور إلى الجنون تقريباً ـ أو إلى الجنون الكامل، كما يقول البعض ـ محاولاته المستمرةُ، لكن المحبطة، لإثبات فرضية الاتصال. ولو أنه عاش حتى عام 1963 لأدرك سبب إحباطه، ذلك أنه في ذلك العام بيّن عالم المنطق الأمريكي بول كوهين P. Cohen (المولود عام 1934) أن هذه المسألة لا يمكن البتُّ فيها: إذ يستحيل إثبات صحتها أو خطئها، ثم إن كاردينالية الأعداد الحقيقية قد تكون أياً من القيم $\aleph_1$، $\aleph_2$، ...، وربما كانت كلَّها.

لقد تعثّرْنَا بِسِمَةٍ مقلقةٍ أخرى للرياضيات عند التعامل مع اللانهاية. فالسؤال الذي يجب أن يبدأ بإثارة عقولنا هو ما إذا كانت الرياضياتُ تفقد هيمنتها وإمرتها الحاسمة عندما نطلب منها أكثر مما يلزم. تُرى، هل يوجد أسئلة أخرى، مثل فرضية الاتصال، جرى السكوت عنها؟ ومثلما يظن بعضهم أن الأعداد الطبيعية تتوقف قبل وصولها إلى اللانهاية، فهل الرياضيات نفسها تتوقف في مناطق معينة، وتملك نقاطاً عمياء في مناطق أخرى؟

قبل الانتقال إلى الحكم على ما إذا كانت الملابسُ الرائعةُ التي تتدثّر بها الرياضياتُ هي، في الحقيقة مهترئة ورثّة، فما يزال ثمة بعض الملاحظات التي تستحقّ أن نوردها، وهي تتعلّق بنتائج كانتور، برغم أنها قد تدفعنا باتجاه حافة الجنون. أولها أن النتيجة التي تقضي بأن الأعداد الحقيقية غير قابلة للعد

(9) الاستعمال متغير قليلاً هنا: فبعض الناس يستعملون المصطلح «transfinite number» للأعداد الترتيبية: ...,1 ,w,w حيث w (أوميغا) أكبر من أي عدد طبيعي.

تعني أن من المستحيل معرفة عدد نقاط قطعة مستقيمة أياً كان طولها. بيد أنه يمكننا أن نكون متوثقين من أنه مهما كان طول القطعة المستقيمة، فهي مكوّنة من نفس العدد من النقاط، أياً كان هذا العدد. لذا فإن عدد نقاط قطعة مستقيمة طولها مليمتر واحد هو نفس عدد نقاط قطعة مستقيمة تمتد من أرضنا إلى المجرّة التالية. تُرى، ما الذي يمكن قولَه عن عدد نقاطِ مستوٍ؟ استطاع كانتور، بحجةٍ ذكيةٍ، أن يبيّن أنّ كلَّ نقطةٍ من رقعة مستوية يمكن وضعها في مقابلة واحد إلى واحد (أحادية) مع كل نقطة من قطعة مستقيمة بقطع النظر عن ساحة الرقعة المستوية وطول القطعة المستقيمة. لذا فإن عدد نقاط رقعة مستوية أياً كانت مساحتها ـ مساحة طابع بريدي إلى أستراليا ـ هو نفس عدد نقاط أي قطعة مستقيمة أياً كان طولها ـ نانومتر أو كيلومتر ـ وكلا هذين العددين يساوي عدد الأعداد الحقيقية. والشيء نفسه صحيحٌ في حالةِ حجمٍ أيًّا كان عدد أبعاده: فعدد النقاط في مكعّب، وعدد النقاط في مكعب فائق hypercube أياً كان حجمه، وعدد نقاط قطعة مستقيمة أياً كان طولها، واحدٌ في كلِّ هذه الأشكال. لذا فمن المذهل أن يكون عدد نقاط كرة بحجم الأرض يساوي عدد نقاط قطعة مستقيمة طولها سنتيمترٌ واحد. ربما بدأْتَ تدركُ سببَ انزعاج كرونكر من مظهر الرياضيات التي انتقلت إلى ما يسميه هلبرت «جنّة كانتور»، وكيف أن اللانهاية مستنقعٌ غدّار يمكنه ابتلاع العقل، ما لم نلزمْ جانبَ الحذَر.



نحن نعرف أنه يوجد الكثير من الأعداد، ونحن نعرفها حين نراها، ولكن ما هي؟ ما هي الأعداد؟ كان لدى اليونان فكرةٌ محدودةٌ عن الأعداد، وربما كان هذا هو السبب في تفوقّهم في الهندسة دون الحساب. لم تساعد الرموز التي استعملوها في الحساب، في حين كان لديهم رموزٌ رائعةٌ في الهندسة الابتدائية ـ خطوطٌ مستقيمةٌ، ودوائرُ مرسومةٌ على سطوحٍ مستويةٍ ـ لكنّ أرقامهم كانت مزعجة. وفي الحقيقة، فإنهم لن يعتبروا 0 وَ 1 عددين، لأن فهمهم كان موجّهاً نحو «التّعداد» numerousness

وليس نحو «العدد» number. فكلما زاد التّعدادُ زاد العدد. عدم وجود الأشياء، ووجود شيء واحد، يفتقران إلى التعداد، لذا فإن 0 وَ 1 ليسا عددين.

برز المفهوم الحديث للعدد حالما ظهرت نظرية المجموعات Set theory في أواخر القرن التاسع عشر. وقد وضع أسسَها كانتور، لكنّ من أضفى عليها الدقّةَ والصرامةَ التامَّيْن هما فريج Frege وبيانو Peano. كان الإيطالي جيوسيبي بيانو (1858-1932) في الرياضيات بمثابة الدكتور كازوبون Casaubon. فكازوبون في مؤلَّفه ميدل مارش Middlemarch كان يحاول كتابة تاريخ جميع الديانات في العالم في متوسط عمره، من عام 1892 إلى عام 1908، أما بيانو فكان يحاول تجميع مبرهناته في جميع فروع الرياضيات في مؤلفه Formulario mathematico. لقد اعتبر بيانو أن مؤلَّفَهُ سيكون ذا فائدة لا تقدّر بثمن للمحاضرين، الذين كلُّ ما عليهم فعله هو إعلان أرقام لمبرهنات في محاضراتهم بدلاً من أن يقدموها كلامياً. ولتشجيع استعمال مؤلَّفه عالمياً، نشر بيانو أعمالَه في «Latino sine flexione»، وهي لغة دولية ابتكرها كانت مبنيَّةً على اللاتينية، وتحوي مفرداتٍ جمّعها من اللاتينية والألمانية والإنكليزية والفرنسية، لكنها كانت مجرّدةً من الضجر الذي تحدثه القواعد اللغوية. إن بيانو، الذي ربما كان يُظن أنه يفتقر إلى الحكمة في تصرفاته العادية اليومية، كان في الأمور الأخرى لطيفاً ومهذّباً، ثم إنه كان يتحلّى بموهبة خسارة الأصدقاء، وذلك بممارسة إحدى مواهبه الفريدة، ألا وهي قدرته على أن يكون صارمَ المنطق. وقد استعمل موهبته للتخلّص من أصدقائه المحتملين إذا كانت حججهم تفتقر إلى الدقة التامة، لكنه وضع هذه الدقة في مكانها الصحيح عند صوغه لأساسيات المنطق الرياضي. حتى برتراند راسل، الذي كان صغير السن آنذاك، ذُهل بدقة بيانو وقوّة حججه التي كان يقدّمها عندما تقابلا عام 1900، وقد تأثر به عندما بدأ بصياغته الخاصة لأسس الرياضيات.

ولسبب غير مقدّس، ربما كان رومنسيًّا، نشر بيانو مسلماته باللاتينية. وقد بنَى علم الحساب على الأسس التالية:

1. 0 هو عدد.

2. إن ما يتلو مباشرةً عدداً هو عددٌ أيضاً.

3. 0 ليس التالي المباشرَ لأيِّ عددٍ.

4. لا يوجد عددان مختلفان يتلوهما نفسُ العدد.

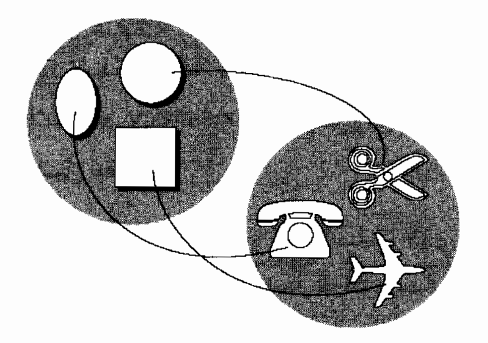
5. أيُّ خاصيةٍ تنتمي إلى 0، وإلى التالي المباشرِ لأيِّ عددٍ له نفسُ تلك الخاصّيّةِ، تنتمي إلى جميع الأعداد.

المسلمة الأخيرة هي مبدأ الاستنتاج الرياضي principle of mathematical induction. فإذا رمزنا إلى «التالي المباشر» بالحرف s، فيمكننا تعريف 1 بأنه 10 (التالي المباشر لِـ 0)، وَ 2 بأنه ss0 (التالي المباشر للتالي المباشر لِـ 0)، وَ 3 بأنه sss0، وهلم جرا. ومع ذلك، فإن المشكلة التي تعانيها هذه الطريقة هي أن بيانو يترك بعض مصطلحاته، مثل «التالي المباشر»، بل حتى «العدد»، دون تعريفٍ، ومازلنا لا نعرف ما هي هذه الأعداد.

عند هذه النقطة، قدّم فردريك لودفيك كوتلوب فريج F. L. G. Frege (1925-1848) إسهاماً جوهرياً، بدا أنه ارتقى بالرياضيات إلى موضع متميز في الفكر الإنساني، لكن ثبت أنه أحدث خراباً فيها. يُعَدُّ فريج مؤسِّسَ المنطق الرياضي، لأنه شرع في بناء مخطَّطٍ منطقيٍّ كامل من شأنه ترسيخ الرياضيات بوصفها خلاصة مقتضبةً للفكر الإنساني. وكي ينجح في ذلك، كان بحاجة إلى تقديم مفهوم العدد، وكي يفعل ذلك في مؤلّفه أسس الهندسة Grundlagen der Arithmetik (1884)، استند إلى مفهوم المجموعة set. المجموعة هي، ببساطة، جماعة من أشياء يمكن تمييزها مثل حسن، محمد، جورج. لقد أُدخلت المجموعاتُ إلى الرياضيات من قبل كانتور، وكان من الضروري تشذيب هذه النظرية خلال العقود التالية من قِبَلِ إرنست زيرميلو (1953-1871) E. Zermelo، وأدولف فرانكل (1965-1891) A. Frankel، اللذينْ أنجزا دعاوي دقيقة تتعلق بخاصيات المجموعات، وكيفية إنشائها (وهذا ما أخفق كانتور في تفسيره)،

وكيفية التعامل معها. وثمة صيغة عامة لنظرية المجموعات الحديثة عرفت فيما بعد بنظرية زيرميلو - فرانكل Zermelo-Fraenkel theory.

قدّم فريج فكرةً مؤدّاها أن الأعداد أسماء تدلّ على أنواع معينة من المجموعات. ولجعل هذا التعريف دقيقاً، قدّم مفهوم **تمديد** extension خاصية. وربما كانت أفضل طريقة للتفكير في الاسم «تمديد» هي اعتباره كلمة مكوّنةً من «مجموعةٍ ممدَّدةٍ» extended collection. لذا فإن تمديدَ الخاصية هو مجموعةٌ تضم جميع المجموعات التي لها نفس الحجم - لأن للخاصية نفس حجم المجموعة حسن، محمد، جورج، مثلاً. إن «الامتلاك نفس الحجم» معنًى محدّداً تماماً في نظرية المجموعات: إنه يعني أن من الممكن وضع عناصر المجموعة في مقابلة أحادية (واحد إلى واحد). وعلى سبيل المثال، فللمجموعة {حسن، محمد، جورج} نفس حجم المجموعة {مقصّ، صخرة، ورقة}، لأن حسن يمكن أن يوضع في مقابلة أحادية مع المقص، ومحمد مع الصخرة، وجورج مع الورقة (الشكل 10-7). قد تبدو نظرية المجموعات تعتني بالتفاصيل في تعريفاتها، لكنها يجب أن تكون كذلك إذا كانت تدعي أنها أساس الرياضيات. إن كون خاصية التمديد «تملك نفس حجم المجموعة {حسن، محمد، جورج}» هو إذن المجموعة المؤلفة من المجموعتين {حسن، محمد، جورج} وَ{مقص، صخرة، ورقة}، وهكذا.



الشكل 10-7. يكون لمجموعة من الأشياء نفس حجم مجموعة أخرى إذا أمكن وضع جميع العناصر في المجموعتين في مقابلة أحادية (واحد إلى واحد). لهاتين المجموعتين حجمٌ واحدٌ، أمّا إذا ألغينا الطائرة، كان للمجموعتين حجمان مختلفان.

وقد تابع فريج تعريف الأعداد الطبيعية بأنها التمديدات التالية:

0 هو اسمُ تمديد الخاصيّة: «لها نفسُ حجم المجموعة المؤلّفةِ من أشياءَ غيرِ متطابقةٍ مع ذاتِها».

(بالطبع، ما من شيءٍ غير مطابق مع ذاته).

1 هو اسمُ تمديد الخاصية: «لها نفس حجم المجموعة 0».

2 هو اسمُ تمديد الخاصية: «لها نفسُ حجمِ المجموعةِ المؤلفةِ من المجموعتين 0 وَ 1.

وهكذا. المظهر الهام لهذا التعريف للأعداد، بأنها مجموعاتٌ تُعَرَّفُ على التوالي بدلالة مجموعاتٍ أصغر منها، يتجلّى في أنه يستعملُ مصطلحاتٍ من المنطق، وهي «خاصيّة» و «مساواة» و «نفي». وقد حَمَلَ هذا المظهرُ فريج على اعتماد فكرة أن الرياضيات هي المنطق، لا أكثر.

أن تكونَ الرياضياتُ هي المنطقَ، قد يكون صحيحاً، لكنّ هذه الفكرةَ لم تكن مرضيةً في عام 1902، وذلك قبل وقت قصير من عزم فريج على أن يرسلَ إلى النشر المجلّد الثاني الذي يحوي عملَه العظيمَ القوانين الأساسيّة لعلم الحساب Grund-gesetze der Arithmetik، الذي بنى فيه كل صرح الرياضيات على هذا التعريف للعدد، تسلّم رسالةً شهيرةً من برتراند راسل يشير فيها إلى أن عمله يتّسم بعدم انسجام inconsistecy. وقد وصف فريج اللحظة الحرجةَ التي فتح فيها رسالةَ راسل بقوله:

من أصعب ما يقابله عالِمٌ[10] أن يرى أنّ الأساسَ الذي بنى عليه عملَهُ قد انهارَ. وهذا الموقفُ هو الذي واجهتُهُ عندما قرأْتُ رسالةً من السيد برتراند راسل، وهذا حدث عندما كنت أَهمُّ بإرسال عملي إلى المطبعة.

كتب برتراند راسل (1872-1970) إلى فريج أن مسألة تمديد الخاصية «لا

(10) نشير إلى أن العالم بالمنطق فريج هو الذي اعتبر نفسه كذلك.

تنتمي إلى ذاتها». لنفترضْ أننا ننظر في مجموعةٍ مؤلفةٍ من مفاهيم ليست عناصرَ من ذواتها. مثلاً، إن مجموعةً مؤلفةً من «أفكارٍ مجرّدة» هي عنصرٌ من ذاتها، لأن المجموعةَ ذاتَهَا فكرة مجردة، في حين أن مجموعةً مؤلفةً من «فاكهة» ليست عنصراً من ذاتها لأن المجموعة ليست فاكهةً. وسأل راسل عمّا إذا كانت مجموعةُ مفاهيمٍ لا تنتمي إلى ذواتها، تنتمي إلى ذاتها. فإذا انتمت إلى ذاتها، فإنها من نوع المجموعة التي لا تنتمي إلى ذاتها. وإذا لم تكن تنتمي إلى ذاتها، فإنها من نوع المجموعة التي تنتمي إلى ذاتها. وخلاصةً، فإذا انتمتْ إلى ذاتها، فإنها لا تنتمي إلى ذاتها، لكن إذا لم تنتم إلى ذاتها. فإنها تنتمي إلى ذاتها وقد عُبِّرَ عن متناقضةِ contradiction، أو محيِّرةِ paradox، راسل في عددٍ من الكتب كما يلي: «يوجد حلاَّقٌ في هذه المدينة يحلق ذقون جميع الرجال الذين لا يحلقون ذقونهم بأنفسهم. فهل يمكن للحلاّق أن يحلق ذقنه بنفسه؟»

دمّرت محيِّرةُ راسل برنامج فريج، ومعه أسسَ الرياضيات. السببُ في الأثرَ المقلقَ لمحيّرةٍ هو أنه إذا أدّت سلسلةٌ من المسلّماتِ إلى تناقضٍ (خُلْفٍ) contradiction فإنه مبرهنةٌ في المنطق بحيث تكون جميعُ الدعاوى في النظام مبرهناتٍ لذلك النظام[11]. لذا إذا كانت تعاريف فريج متناقضة، فإن أيّ مبرهنة يَرِدُ فيها أنّ «2=1» وأن «π عدد منطَّق»، يُمكن استنتاجُها من هذه التعاريف. لذا، فإن مسلماتِهِ، باعتبارها أساساً لعلم الحساب، كانت أسوأ من كونها غير مفيدة.

كان راسل، شأنه شأن فريج، مهتماً جدًّا بأسس الرياضيات، وكان مهتماً بنفس الدرجة بمحاولة إثبات أنها ليست سوى فرعٍ من علم المنطق. وهذه هي وجهة

(11) نبدأ بالمبرهنة (pq) p، حيث تعني «لا»، يجب أن تُقرَأ «إذاً... فإن»، p وَ q دعويان. لنفترض أن الدّعوييْن p و p تُستنتَجان كلتاهما من المسلّمات. لما كانت p صحيحة وفقاً «لقاعدة الفصل detachment» فيمكننا أن نستبعدها وأن نستنتج من المبرهنة أن pq. عندئذٍ، لمّا كانت. p صحيحة، وفقاً لقاعدة الفصل ثانيةً، فيمكننا استبعادها، واستنتاج q. أي أن q صحيحة أياً كانت الدعوى.

نظر المدرسة المنطقية logicist school في فلسفة الرياضيات. وفي عام 1903، كان راسل نشر مؤلَّفه مبادىء الرياضيات The Principles of Mathematics، وكان أستاذُه السابقُ، الذي أصبح زميلَه في كيمبردج آنذاك، ألفرد نورث وايتهيد A. N. Whitehead (1947-1861) يُعِدُّ طبعةً ثانيةً لكتابه رسالة في الجبر العام A treatise on universal algebra. وقد قرّر الرجلان التعاون في مشروعٍ أكثر طموحاً، وهو تبيان أن الرياضياتِ كلَّها ليست سوى مجموعةٍ جزئيّةٍ من المنطق. هذا العمل، الذي تطلّب إعدادُهُ عقداً من الزمان، ظهر أخيراً في ثلاثة مجلدات بعنوان مبادىء العلوم الرياضية Principia mathematica في الأعوام 1910 وَ 1912 وَ 1913. وقد كانت النيَّةُ إصدارَ مجلّدٍ رابعٍ في الهندسة، لكنّ ذلك لم يتحقّق. وقد استعملَ كتابُ **مبادىء العلوم الرياضية** عَلاماتٍ رمزيةً معقدةً أكثر من تلك التي استعملها پيانو أو فريج؛ ويبيّن الشكل 10-8 فكرةً عن هذا التعقيد، وهو برهان راسل ووايتهيد على أن 2 = 1+1.

$*54{\cdot}43.\ \vdash :.\ \alpha, \beta \in 1 . \supset : \alpha \cap \beta = \Lambda . \equiv . \alpha \cup \beta \in 2$

البرهان

$\vdash . *54{\cdot}26 . \supset \vdash :. \alpha = \iota' x . \beta = \iota' y . \supset : \alpha \cup \beta \in 2 . \equiv . x \neq y .$

$[*51{\cdot}231] \qquad \equiv . \iota' x \cap \iota' y = \Lambda .$

$[*13{\cdot}12] \qquad \equiv . \alpha \cap \beta = \Lambda \qquad (1)$

$\vdash . (1) . *11{\cdot}11{\cdot}35 . \supset$

$\quad \vdash :. (\exists x, y) . \alpha = \iota' x . \beta = \iota' y . \supset : \alpha \cup \beta \in 2 . \equiv . \alpha \cap \beta = \Lambda \qquad (2)$

$\vdash . (2) . *11{\cdot}54 . *52{\cdot}1 . \supset \vdash . \mathrm{Prop}$

يترتب على هذه الدعوى، بعد تعريف الجميع الحسابيّ، أن 1+1 = 2

وفي وقت لاحق:

$*110{\cdot}643.\ \vdash . 1 +_c 1 = 2$

البرهان

$\vdash . *110{\cdot}632 . *101{\cdot}21{\cdot}28 . \supset$

$\vdash . 1 +_c 1 = \hat{\xi}\{(\exists y) . y \in \xi . \xi - \iota' y \in 1\}$

$[*54{\cdot}3] \qquad = 2 . \supset \vdash . \mathrm{Prop}$

إن الدعوى السابقة مفيدة أحياناً. إنها مستعمَلةٌ ثلاثَ مرّاتٍ على الأقل

في 133.66* وفي 120.123.472 *

110.7.71* مطلوبة لإثبات أن 110.72,* و 110.72,* مستعملة في 117.3*

وهذه الدعوى أساسية في نظرية الأكثر والأقل

الشكل **8-10**. صورة للبرهان على أن 1+1 = 2 كما ورد في principia mathematica

كان راسل ووايتهيد بحاجةٍ إلى التغلّب على عدم الانسجام الذي أحاق بعمل فريج. لذلك، قدّم راسل نظريته في الأنماط theory of types، حيث يُسنَدُ إلى عناصر المجموعات «نمطٌ»، وحيث يمكن لأي مجموعة أن تحتوي عناصر من نمط أقلّ، فقط. وهكذا فإن الكينونات المنفردة هي من النمط 0، والدعاوى المتعلقة بمجموعاتٍ تلك الكينونات المنفردة هي من النمط 1، وهلم جرًّا. ولمّا كان من الممكن للمجموعة أن تحوي مجموعاتٍ من نمط أدنى فقط، فلا يمكن أن تكون عنصراً من ذاتها، وهذا يستبعد محيّرةَ راسل. لكن نظرية الأنماط مازالت غير متمتعة بما يكفي من القوة لإلغاء بعض المحيِّرات، مثل «محيّرة بيري» Berry's paradox، وهي الدّعوى المكوّنة من الكلمات الإنكليزية العَشْر التالية: «the least integer not definable in fewer than eleven words». بيد أن ذلك الـ «integer» الذي يحقّق هذا الشرط، يُعَرَّفُ في الحقيقة بدعوى مؤلفةٍ من عشرِ كلماتٍ، ومن ثَمّ فإن هذه الدعوى متناقضة. وَتَعَيَّنَ على راسل أن يصطنعَ بطريقةٍ متسرّعةٍ وغير متقنةٍ صيغةً لنظريّة الأنماط أسماها النظرية المشعّبة للأنماط ramified theory of types، ليتحاشى فيها أخطار الغوص في هذا المستنقع أيضاً. وفي النظرية المتشعّبة، قُدِّمَتْ ملاحظاتٌ لا على نمطِ الكينونةِ قيد الدرسِ فقط، بل أيضاً على الأسلوبِ الذي عُرِّفَت به. هذا وإن كتابَ مبادىء العلوم الرياضية مبنيٌّ على النظرية المتشعبة للأنماط.

قد يكون الانطباع الذي تولّد لدينا هو أن النظرية المتشعبة للأنماط هي خليط من الحجج الخاصة الحقيقة هي أنها أسوأ من ذلك، لأنه تبيّن أن من المستحيل أن نثبت اعتماداً عليها أن لكلّ عدد طبيعي عدداً يليه، أو أنه يوجد عدد غير منتهٍ من الأعداد الطبيعية. وللتغلّب على نقاط الضعف هذه، فمن الضروري أن نضيف إلى هذا الخليط من الحجج مسلّمة اللانهاية axiom of infinity، التي تؤكّدُ، ببساطةٍ، وجودَ اللانهاية. والأسوأ، في سياق هذه الإضافات المزعجة، هو أنه كي تُعَرَّفَ الأعدادُ بطريقةٍ سلميةٍ، لابد من أن يضاف أيضاً إلى جُعْبةِ هذا الخليط مسلّمة قابلية الاختزال axiom of reducibility، المتعلقة بسلوك الدعاوى التي لها ترتيبٌ مختلفٌ. وبطريقة ما، كانت ألغاز أجندة أصحاب النظرية

القائلة إن الرياضيات فرع من المنطق آخذة في الحلّ، إذ بدأ يتّضح أن الرياضيات ليست مجردَ فرعٍ من المنطق.

ما أصبح واضحاً أيضاً هو وجودُ مشكلاتٍ تعتبر نظريةَ المجموعات سبق تقديمها كأساسٍ للرياضيات. وربما كان يمكن تعقّب المشكلة أن يوصلنا إلى مشكلةٍ جوهرية تتعلق بالمجموعات تبدو بسيطة وحميدة. فهل المجموعة مفهوماً أوسع من أنْ تحتمله الرياضيات؟ وقد برز بعض الدّعم لهذه الفكرة في بواكير القرن العشرين، وذلك في نفس الوقت تقريباً الذي كان راسل وفريج يتصارعان فيه مع مسائلهما، وإذ ذاك ظهرت مسلّمة الاختيار axiom of choice. هذه المسلمة هي النظير المنطقي لمسلّمة إقليدس الخامسة (المتعلقة بالخطوط المتوازية، الفصل 9)، وقد جذبت قدراً كبيراً جدًّا من الاهتمام. وفي أبسط صيغها تبدو حَمَلاً وديعاً: فإذا كان لديك سلسلة من المجموعات، عندئذٍ يمكنك تكوين مجموعة أخرى باختيارك عنصراً من كل مجموعة وإضافته إلى سلّتك التي تحملها في مركز تسوّقِكَ. نحن نفعل ذلك بهذه الطريقة عندما نكون في مركزٍ للتسوّق، وندعو مجموعة ما اخترناه «تسوّقاً». تُرى من يمكنه أن يحاجَّ في أن هذا الإجراء يختلف عن تكوين المجموعات؟

سيخلع ما كنا نظنه حَمَلاً وديعاً الصوف الذي يكسوه، ويتبيّن أنه ذئبٌ حالما نفكّر في مجموعاتٍ غيرِ منتهيةٍ، بسبب أنه ربما لا توجد طريقة لتحديد الاختيار. ففي حال عددٍ منتهٍ من المجموعات، يمكننا أن نقوم بمجرد وضع جدولٍ للعناصر التي نختارها ـ نحن نجمِّعُ قائمةَ تَسَوُّق. لكنْ لننظر مليًّا في المسألة التالية: لدينا عددٌ غير منتهٍ من المجموعات، إحداها تحوي الأعداد الحقيقية المحصورة بين 0 وَ 1، وتحوي التاليةُ الأعدادَ بين 1 وَ 2، وهلم جرًّا. سنقرر الآن تكوينَ مجموعةٍ جديدةٍ باختيارِ عددٍ كيفيٍّ من كلٍّ من تلك المجموعات. لسوء الحظ، لا يمكننا وضع ما اخترناه من العناصر في قائمة بسبب وجود عدد غير منتهٍ مما اخترناه. ثم إنه لا يمكننا تحديد العناصر بقاعدة، لأننا اخترناها عشوائيًّا. لذا نكون قد شكّلنا مجموعةً لا يمكننا تحديدُها. وقد أورد راسل مثالاً مألوفاً لتبسيط الصعوبة التي تكتنف مسلّمة الاختيار كما يلي:

لدى رجلٍ غنيٍّ عددٌ غيرُ منتهٍ من أزواج الجوارب، وقد أمر خادمَهُ باختيار جوربٍ من كلّ زوجٍ منها. لا يستطيع الخادمُ متابعة الموضوع لعدم وجود طريقة يقرر وفقها الجوربَ الذي يختاره من كل زوج.

ثمة ثلاثة مواقف تُتَّخَذُ تجاه مسلّمة الاختيار، وعادة ما يَختار الرياضيون إحداها، إمّا عن وعيٍ أو بدون وعيٍ. أحدُ المواقفِ يتخذه الرياضيون الذين يتصرفون بطريقةِ النعامة، فهم يتجاهلون المشكلاتِ التي تمثلها المسلّمةُ، ويتابعون عملهم طوعاً أو كرهاً. وهذا هو رأي جميع علماء الفيزياء، الذين لا يعرف معظمهم أن ثمة مشكلة، وهم يهزّون أكتافهم استهجاناً، أو لامبالاةً، عندما يُجْذَبُ انتباهُهم إلى المشكلة، ثم تُشْرَحْ لهم. ثم هناك الرياضيون الذين يعرفون المشكلة ويستعملون مسلّمة الاختيار في برهانٍ منطقيٍّ كملاذٍ أخيرٍ فقط. إنهم يَجهدون في العثور على طرقٍ بديلة بين مسلمتهم ونتائجهم، مستعملين في ذلك حججاً غالباً ما تكون ملتوية. وأخيراً، هناك القدّيسون الرياضيون، الذين لا يمسون هذه المسلّمة من قريب أو بعيد، ويروْن أن كلّ برهان يستند إليها غير صحيح.

●

إذا لم تكن الرياضيات فرعاً صرفاً من المنطق، كما يدّعي بعض العاجزين، فما هو المكوِّن الإضافيُّ الذي تقدّمه؟ ولاستخراج مكوِّنٍ إضافي ممكن، علينا العودة إلى ابن صانع السروج، وأكثر الفلاسفة عمقاً وتأثيراً في القرن الثامن عشر، الذي قد يكون نصف اسكتنلندي، هو إيمانويل كانط (1724-1804) I. Kant[12]. وفي مناقشته للمعرفة الميتافيزيقية، وهي المعرفة الفلسفية التي تسمو فوق حدود التجربة، قدّم كانط في كتابه نقد الفكر المحض kritik der reinen vernunft عام 1781، الفرق بين القضايا «التركيبية» synthetic والقضايا «التحليلية» analytic. القضية التحليلية هي تلك التي يمكن فيها استخراج الخبر من الموضوع بواسطة التفكير

(12) ولد كانط في سكوتيا Scotya، وهي إحدى ضواحي كوينسبرغ في شرق بروسيا (كالييننغراد)، وكان ضمن مجموعةٍ من المهاجرين الأسكتلنديين. ويُظَنّ أن جدَّه كان اسكتلنديًّا. ومع أنّ عقله كان واسعَ المجالِ والتجوالِ، غير أنه لم يغادر كونيغسبرك قطّ.

وحده دون أن تنقل معرفة جديدة، كما في القضية «جميع أنواع الجَزَرِ هي خضروات». ووفقاً للفلاسفة الوَضْعِيِّين في أوائل القرن العشرين، الذين اعتمدوا هذا المصطلح وأوضحوه، فإن حقيقة القضية التحليليّةِ تتوقف فقط على معنى الكلمات التي تتكوّن منها هذه القضية، وعلى القواعد اللغوية التي تخضع لها. لكن القضية التركيبية هي تلك التي لا يكون فيها الخبر محتوًى في الموضوع، كما في القضية «الورد أحمر اللون»، ذلك أن ليس جميع الورود حمراء اللون؛ ومثل هذه القضايا تنقل معرفة جديدة. ويقسم هذان النوعان من القضايا إلى قضايا استنتاجية a priori عندما يكون تقييم الحقيقة مستقلاً من التجربة، وقضايا استدلالية a posteriori، عندما تتوقف صحة الدعوى على التجربة.

افترض كانط أن القضايا الاستنتاجية التركيبية، التي تعبّر عن معرفة جديدة، لكن مستقلة عن التجربة، هي الأهداف الصحيحة للتساؤلات الفلسفية. وتتضمن هذه القضايا افتراضاتٍ تتعلق بالمكان والزمان، اللذين هما، من وجهة نظره، لا يخضعان للمساءلة، واللذين يُبْنَى إدراكهما بطريقة ما في أدمغتنا. وبالنسبة إلى كانط، فإن معتقدات الهندسة الإقليدية وخاصيات الأعداد الطبيعية هي قضايا استنتاجية مركّبة. وهو يرى أن مبرهنات الرياضيات هي شروح لخاصيات المكان والزمان، توضح بطريقةٍ ما شبكاتِنَا العصبيةَ (وهذا مصطلحٌ لم يستعملْه، بالطبع) وأساليبنَا في الإدراك.

إن الإحساسَ بأن ثمة شيئاً متأصلاً في الأعداد الطبيعية، التي كانت خاصّيّاتٍ استنتاجيةً مركَّبةً مباشرةٌ وواضحةٌ للعالِمَ، دخل في فلسفة الرياضيات التي تُعْرَفُ باسم الحَدْسيّة intuitionism بواسطة الرياضي الهولندي لويتزن إغبرتوس جان براور (1881-1966) L.E. Jan Brouwer. وهذا الرياضي هو من مؤسسي الطبولوجيا topology، وذلك في رسالة الدكتوراه التي قدّمها عام 1907 في جامعة أمستردام. وقد نبذ براور فكرةَ كَانط، التي تذهب إلى أن الهندسةَ استنتاجيةٌ تركيبيةٌ، وهذه حقيقة تثبت مع الإدراك بأن مسلّمة إقليدس الخامسة، برغم كونها منسجمةً مع المسلّمات الأربع الأخرى، فمن الممكن الاستعاضة عنها بمسلّماتٍ أخرى دون الوقوع في تناقض (كما رأينا في الفصل 9). وهذا يعني

أن براور قَبِلَ أنّ كَانْط كان مخطئاً في افتراضه أن الهندسة الإقليدية صحيحة بالضرورة، لأن ثمة هندساتٍ بديلةً بيّنت التجربة أنها تقدّمُ وصفاً للمكان والزمان. بيد أنه لم يرفض كامل وجهة نظر كَانط في أن الرياضيات هي دراسة المكان والزمان، لكنها تشكّل المركّبةَ المكانيَّة فقط. اعتبر براور أن الرياضياتِ تقريرٍ عن وعينا للزمن، ونشر الفكرة القائلة إن الأعداد الطبيعية تنبثق من مسحنا لمجموعةً من الكينونات على التوالي، وأن الفَصْلَ المؤقّتَ لفهمنا لكلٍّ منها هو مفتاح الحلّ لتمييزها. بل إن براور ذهب إلى أبعد من ذلك: لقد كان يؤمن بالنظرية التي تقول إنْ لا وجودَ لشيءٍ غير الأنا، وتَعتبرُ أنّ لأيِّ شيءٍ وُجِدَ، بما في ذلك العقولُ الأخرى، مصدراً واحداً هو عقلنا الواعي. بيد أن وجهة النظر هذه هي تعقيدٌ غيرُ ضروريٍّ لأجندة أنصار الحدسيّة، ويبدو، من النظرة الأولى، أنّ لا لزومَ لمتابعةِ هذه السِّمةِ (لكنني سأتطرّق إلى صيغةٍ لها سأحبّذها، وذلك في وقت لاحق).

ويعتمد المؤمن بالحدسيّة وجهةَ النظر القائلة إن للأعداد الطبيعية وضعاً خاصًّا، وبأن لنا حَدْساً مباشراً بها: فهي ليست كينوناتٍ يمكن إتقانها بمزيدٍ من الدراسة. ويرى براور أنه كي تصل إلى مفهوم عددٍ طبيعيٍّ، علينا ملاحظة استيعابنا للفرق بين الكينونات الناشئة عن الترتيب الزمنيّ لمسحنا لها، وأن نختارَ رقماً في كل مرّةٍ يهملُ به إدراكُنَا أحدَها. وتقتضي وجهة النظر هذه أن الأعداد الطبيعية هي إظهارٌ لنشاطنا العقليّ. وبالمثل، فإن العملياتِ الحسابيةَ، مثل الجمع، يجب اعتبارها أوصافاً للعملياتِ العقلية التي تجري داخل رؤوسنا. وهكذا للإثبات أنّ 4+1 = 3+2، علينَا تنفيذ مجموعةٍ من المهمّاتِ: فعلينا الحكم على نتيجة إضافة 2 إلى 3، وأيضاً ءضافة 1 إلى 4، ثم التحقق من أنّ النتيجتين متساويتان.

ثمة نتائجُ مزعجةٌ معيّنةٌ للحدسيّة، وهي لا تتّضح فوراً من هذا العرض المختصر، لكنْ يجب الإشارةُ إليها لأنها تؤثر في صميم جوهر المنطق الكلاسِيّ. وهذا يتعلق بوجه خاص بالحالة التي نتعامل فيها مع القضايا المتعلقة بالمجموعات غير المنتهية من الكينونات، التي لا يرتبط بها نشاطٌ عقلي يتعلق بإدراكها، ذلك أنه لا وجود لتجربةٍ مباشرةٍ مع اللانهاية. وعلى سبيل المثال، عرّف أرسطوطاليس، أحدُ أعمدة المنطق، في مقالته بعنوان قانونِ الوَسَطِ

المُستثنَى law of the excluded middle، بقوله إن القضيةَ إمّا أن تكون صحيحةً أو خاطئةً. هذا القانون لا يُعتبر صحيحاً في الرياضيّات الحدسية، لأنه قد توجد قضيةٌ لم يبرهن على صحتها أو أنه لا يمكن تقرير كونها صحيحةً أو خاطئةً. وفي كلتا الحالتين، لا نستطيع القول إنها صحيحة أو خاطئة إلاّ إذا جرى البرهان على صحتها. إن إحدى نتائج هذا الوضع هي أن القولَ إنه ليس صحيحاً أن دعوىً ما خاطئةٌ، لا يكافىء القول إن تلك الدعوى صحيحة[13]. في حين أننا قد نؤكد أن قولنا بعدم صحة وجودِ كرةٍ ليست حمراء اللون في صندوقٍ يحتوي عدداً غيرَ منتهٍ من الكرات، يكافىء قولنا إن كلَّ كرةٍ في الصندوق حمراءُ اللون، لكنّ المؤمنَ بالحدس يرفض هذه النتيجة. ويرى مؤيدو الحدسيّة أن حقيقة الدعوى بوجود كرة ليست حمراء في الصندوق لا يمكن إثباتها إلا بفرز جميع الكرات في الصندوق، وهذا عملٌ يستحيل تنفيذه في مجموعةٍ غير منتهيةٍ. وهناك نتيجة أخرى لهذا الوضع هي أنه من المستحيل إثبات أن قضيةً معينةً خاطئةٌ بسلوكِ طريقةِ نقض الفرض reductio and absurdumm لتبيان أن نفي الدعوى خاطىء، أو أنه يؤدي إلى تناقض. وفيما يتعلق بمؤيدي الحدسيّة، فإن القضايا الوحيدة المقبولة هي تلك التي تقدَّم لها براهين واضحة لها عدد منتهٍ من الخطوات.

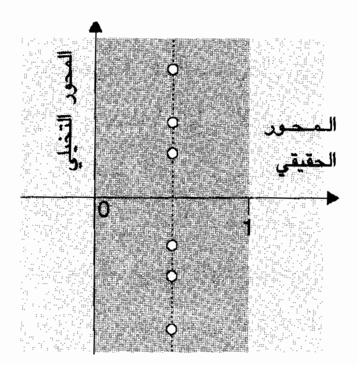
●

كان ديفيد هلبرت D. Hilbert (1862-1943)، الذي عُرف عنه مهارته في الرقص ومغازلة النساء، أكثرَ رياضيّي القرن العشرين تأثيراً. وُلِد، مثل كانط، في كوينسبرغ في شرق بروسيا (ومن قبيل المصادفة، وُلِدَ هناك أيضاً غولدباخ). وقد اشتهر بوجهٍ خاصٍّ في عرض ما اعتبرها مسائلَ غيرَ مبتوتٍ فيها في الرياضيات في منقلب القرن، وفي بداية القرن العشرين. ومنذ ذلك الوقت بدأ الرياضيون صراعاتهم وكفاحاتهم المرهقة لحلّها. وقد قُدِّمَتْ تلك المسائلُ في المؤتمر الدّولي الثاني للرياضيات الذي عُقِد في باريس عام 1900. وفي

(13) اي ان $\sim(\sim p)$ لا يكافىء p.

محاضرته هناك عرض عَشْرَ مسائل؛ وخلال عمل هلبرت لنشر هذه المسائل، ارتفع عددها إلى ثلاث وعشرين، ومن المفضّل اعتبار هذه المسائل مجموعاتٍ مركَّبَةً من المسائل ـ مضافاً إلى تلميحاتٌ إلى حلولها ـ لا ثلاثاً وعشرين مسألة كتلك التي تصاغُ جيداً في الامتحانات، وقد كان يتطلّب هلبرت أن تكون المسائل عموماً تستحق الوقت الذي يجري فيه محاولةُ حلّها، وأن تكونَ واضحةً، وصعبةً، لكنْ ألاّ تكون من النوع الذي يتعذّر حلّها. ثم إنه يجب عليها، عندما تُحَلُّ، أن تسلِّطَ الضوء على مجالٍ أوسع من ذلك الذي حُلَّتِ المسألةُ فيه.

لقد حُلّت بعض هذه المسائل؛ وبُرْهِنَ على أن بعضها الآخر غير قابل للحلّ؛ لكنْ ثمة مسائل مازال الرياضيون يتصدَّوْنَ لحلّها. وقد ذكر هلبرت أن بعض المسائل تتّسم بتعقيدٍ بالغ، ويصعب الحكم على ما إذا يمكن الوصول إلى حل لها مثل حلول المسائل الأخرى. فمثلاً، كانت إحدى تلك المسائل العظيمة إيجاد مسلّماتٍ للفيزياء تضعها على أسس موثوقة وراسخة، مثلما فعل إقليدس في هندسته، وكما صاغ هو، هلبرت، أسساً أخرى للهندسة في رسالة الماجستير التي قدّمها عام 1899 بعنوان أسس الهندسة Grundlagen der Geometrie. هذا وإن صوغ «نظرية كل شيء» theory of everything يمكن تفسيرها على طريقته الخاصة الموجودة في عقله، والتي لم يُفْصِحْ عنها. ومع ذلك فمعظم المسائل محَدّدة تماماً، وبخاصةٍ عند تفسيرها بإسهاب، وعلى سبيل المثال، تضم هذه المسائل برهان فرضية كانتور في الاتصال continuum (التي تبيّن أنه لا يمكن البرهان عليها)، وفرضية ريمان، القائلة بأن دالةً function معينةً للمتغير العقدي z تساوي الصفر عندما تأخذ z عدداً غير منتهٍ من القيم، القسمُ الحقيقيُّ لكلٍّ منها يساوي 1/2 (الشكل 10-9). قد تبدو المسألة الأخيرة غيرَ هامّةٍ، لكنها في الواقع تحظى بأهمية بالغة في دراسة الأعداد الأوليّة. مازالت هذه المسألةُ غيرَ محلولة، وهي تُعَدُّ إحدى أهمّ المسائل غير المحلولة في الرياضيات. وفي وقت لاحق، سننتطرق إلى مسألتين أخريَيْن لهلبرت. ومسألته الثانية، التي تصدّى لها غوديل Gödel وحلَّها سلباً، هي إثبات أن مسلمات علم الحساب ليست متناقضة. ومسألته العاشرة المسماة مسألة القرار Entscheidungsproblem،



الشكل 10-9. من المعروف أن جميع حلول المعادلة $1+1/2^2+1/3^2+1/4^2+... = 0$، حيث x عدد عقديّ، تقع في الشريط المظلل بين 0 وَ 1. إحدى صيغ فرضية زيمان تؤكد أن جميع حلول هذه المعادلةِ تقع على المستقيم الواقع في وسط هذا الشريط (وهذه الحلول مشارٌ إليها بدوائر صغيرة)، والقسم الحقيقي للحلول z يساوي 1/2 في كل حالة.

التي عولجت وحُلّت سلباً أيضاً ـ من قِبَلِ آلان تورنغ A. Turing وَألونزو وتشيرش A. Chrurch ـ وهي تتعلق بتصميم عمليةٍ تمكّننا، باتباع عددٍ منته من الخطوات، من معرفة ما إذا كانت معادلةٌ قابلةً للحلّ أم لا.

ابتكر أيضاً هلبرت فلسفةً للرياضيات أُطلق عليها اسم الشكلية formalism. وقد رأى الرياضياتِ وكأنها ملاءتَا ورقٍ لصقتْ إحداهما بالأخرى: إحداهما تحوي الترتيبات المنتهية للرموز التي نتجت من تطبيق قواعد معينة. وتشكل هذه الرموز أنماطاً محدَّدةً على الصفحة، لكنها خالية تماماً من المعنى. هذه الأنماط التي لا معنى لها هي ما نعنيه حقًّا بالرياضيات. وحتى مسلمات الأنظمة الرياضية، فإنها ليست سوى مجموعة من العلامات جفّ معناها، وهي جثث فكرية، ويستنبَط من هذه المجموعاتِ أنماطٌ جديدة بواسطة تطبيق قواعد مجردة. وبهذا المعنى، فإن الرياضيين هم مصمِّمون للأوراق التي تُكسى بها جدران الغرف. ويرى هلبرت أن البراهين الموثوقة الوحيدة هي متناهية finitistic، بمعنى أنها مجموعات منتهية من الرموز، لأن مثل هذه المجموعات هي الوحيدة التي يمكن فحصها والتحقق من صحتها: الرياضيات الآمنة هي رياضيات منتهية. وعلى الملاءة الثانية يوجد ما وراء الرياضيات، التي تتألف من التعليقات على الرياضيات الحقيقية، وهي تحوي ملاحظات مثل «هذه المجموعة من الرموز تشبه أخرى»، وأن «x يجب تفسيره على أنه علامةٌ خاصة لكينونةٍ ما»، وأن «زمرةً معيّنةً من الإشارات تدلّ على أن نمطاً ما كاملٌ»، وأن «هذا إثباتٌ لتلك الدعوى». ويمكننا التفكير في الرياضيات ذاتها بأنها الأنماط الممكنة لِقطَعٍ على رقعةٍ للشطرنج، والرياضيات التي توافقها تعليقاتٌ مثل «ثمة عشرون حركة

افتتاحية ممكنة للأبيض» أو «في هذا الوضع يموت الشاه». ويرى مؤيدو الشكلية أن الرياضياتِ رمزيّةٌ مجرّدةٌ وتوليدٌ للنماذج: فالرياضيات تمنح الرمزيّةَ والأنماطَ التي تهم البشر، وهي تُشْرِبُ الإشاراتِ «بمعنًى»؛ إنها تعيد الدم إلى الجثث.

●

ثمة مدرسة أخرى للتفكير في طبيعة الرياضيات، وهي الواقعية الأفلاطونية Platonic realism. والرياضيون الذين ينتمون إلى هذه المدرسة. يديرون ظهورهم لأنصار الشكليّة، وهم يرون أن الرياضيات هي توليد مجموعات من الرموز لا معنى لها. وهم يديرون ظهورهم أيضاً لمؤيدي الحدسية الذين يصرون على أن الرياضيات هي أحد إسقاطات العقل، وأن وجودها يظل دون معنى ما لم يوفِّرُ البرهانُ، وأنه في غياب الوعي، لا وجود للأعداد أو أشياء مثل المستقيمات المتوازية. وكما هو الحال لدى مؤيّدي الشكلية والحدسية، فهم يقبلون بعدم كمال فكرة المناطقة التي تذهب إلى أن الرياضيات ليست أكثر من فرع من المنطق.

ويعتبر مؤيدو الواقعية الأفلاطونية platonist أن المركِّبة المفقودَة هي الواقعية. هذا ويرفض الرياضيون الأفلاطونيون العلاقاتِ الموجودةَ مسبقاً، وهم يشرعون بهذا الرفض عن طريق إعمال تأملاتهم الفكرية في هذا العالَم. إنهم مكتشفو الحقيقة، وليسوا مبتكِرين. وتمثل الأعداد لهم كينوناتٍ حقيقيّة، أمّا العلاقاتُ بين الأعداد فهي دعاوى بخصوص شيء ما. وفيما يتعلق بهم، فالخطوط المستقيمة، والمثلثات، والكرات هي حقيقية، مَثَلُها في ذلك مَثَلُ الصخور، ثم إن الحقائق الحسابية (التي تعني أيَّ نوع من الحقيقة الرياضية، وربما أكثر من ذلك) هي تعليقاتٌ على نوعٍ من الواقعيةِ. وهكذا فهم يرفضون التحفّظاتِ العقيمةَ للشكليّةِ، والانخراطَ الذاتيَّ للحدسيّةِ، ويعتبرون أنهم علماءُ مثلنا. إنهم يستخرجون حقائق سرمديّةً، وهم، في معارضتهم العنيفة لموقفِ الحدسيّين، يعتبرون أنّ ثَمَّةَ حقائقَ موجودةً حتى لو لم يكتمل صوغُ براهين لها.

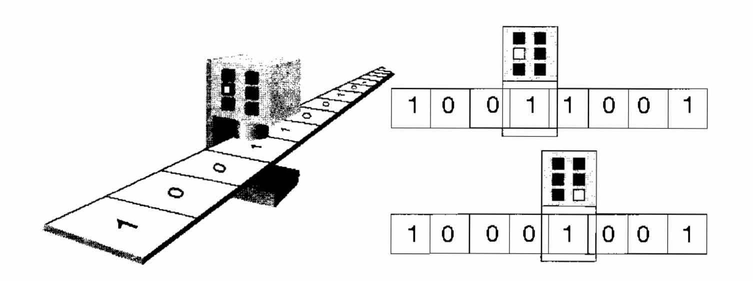
●

سأتطرق الآن إلى اثنتين من مسائل هلبرت المهمّة، وهما تقعان في صميم فلسفة الرياضيات، وتفحصان فعاليتها مباشرةً. وكما سبق وذكرتُ، فإن إحدى مسائله تلك المسماة مسألة القرار، التي تبحث عن طريقةٍ منهجيّةٍ لمعرفة ما إذا كانت أيُّ دعوى واردةٍ بلغةٍ رمزيةٍ قابلةً للبرهان باستعمال مسلّمات تلك اللغة. لقد تصدّى لحلّ هذه المسألةِ، في وقتٍ واحدٍ تقريباً، رياضيّان، أحدهما عالمُ المنطق الأمريكيّ ألونزو تشيرش (1903-1995) A. Church، الذي ابتكر ما أسماه حساب λ λ-calculus، والثاني الرياضيُّ البريطانيُّ ألان ماتيسون تورينغ (1912-1954) A.M.Turing، الذي ابتكر «آلة الحوسبة المنطقية» التي تُسمّى الآن آلةَ تورينغ Turing machine. وكانت الطريقتان اللتان سلكاهما مختلفتيْن سطحيًّا؛ لكن تشيرش وتورينغ تعاونا ليُظهِرا أن طريقتيْهما متكافئتان رياضيًّا. وهذه قوّةٌ جِدُّ مهمةٌ في الرياضيات، وأعني بها قدرتها على إظهار التكافؤ بين شيئين يبدوان بعيديّن كلّيًّا أحدُهما عن الآخر. سنركّز على طريقة تورينغ لأنّ لها تجاوباتٍ أكثرَ مع العالَمِ الجديدِ المألوفِ للحواسيب، لكنْ يجب ألاّ نهمل أنّ الحسبان λ، الذي ابتكره تشرشل، له تجاوباتٍ مع أساس تنوّعات البرمجيّات software varieties التي تستعملها هذه الحواسيب.

آلة تورينغ هي جهازٌ يُقال إنه يحاكم أعمالَ الناسِ الذين يقومون بأيِّ نوعٍ من الحوسبة الخوارزميّة algorithmic computation؛ وهي حوسبةٌ تُنفَّذُ بتطبيق سلسلةٍ من القواعد بالتتابع، والتي تعرف الآن أنها تمثيلٌ لحاسوبٍ رقميٍّ. وفي الحقيقة، فإن عمل تورينغ في فكّ التّرميز (الشِّفرة) code-breaking في Bletchly Park، شمال لندن، خلال الحرب العالميّة الثانية، وبعدها في مانشستر، أدّى إلى أوّلِ تحقيقٍ لحاسوبٍ إلكترونيٍّ رقميٍّ قابلٍ للبرمجةِ. ويعود الفضل إلى تورينغ نفسِهِ في تقصير أمد الحرب أشهراً، إنْ لم يكن سنواتٍ، وذلك لنجاحه في فكّ الشِّفرة، ومن ثَمَّ حماية أرواحِ الآلافِ من الناسِ. وإنه لَمِنَ العارِ على إنكلترا منتصفِ القرنِ العشرين أنْ تلاحقه القوانينُ والأعرافُ الاجتماعيةُ ليموت في سنٍّ مبكِّرة (فقد كان لُوطِيًّا).

لقد سعى تورينغ لاستخراجِ الجوهر في الطريقة التي يسلكها شخصٌ

يقوم بإجراء حساباتٍ، ثم تَفَحَّصَ تقييدات هذه العمليةِ: فهل كان ثمة أسئلة يمكن طرحها بحيث أنها، مهما طال عمل الشخص، لا تؤدّي إلى جواب؟ كانت طريقة تورينغ في معالجته للموضوع مغلّفةً (مكبسلةً) encapsulated في جهازٍ مكوَّنٍ من شريطٍ ورقيٍّ يمتدّ بلا حدود، ومقسَّم إلى خلايا مربّعةٍ (يحاكي مصدراً غيرَ منتهٍ من الورق والأقلام التي يمكن للحاسوب البشري أن ينشرها، لينفّذ الحساب، ويسجّلَ ملاحظاتٍ على الأجوبة الوسيطة، ثم يكتب الجواب النّهائي)، ورأسٍ للقراءةِ والكتابةِ يمكن برمجتُهُ ليجيبَ بأسلوبٍ ملائمٍ عن أيّ شيء مكتوبٍ في الخلية التي كان يعاينُها في تلك اللحظة (الشكل 10-10)، ومن الممكن أيضاً لهذه أن تعدّلَ وتُلَقَّمَ في رأس القراءة من الشريط الورقيّ.



الشكل 10-10. نموذجٌ لآلةِ تورينغ. الآلة مؤلفة من شريطٍ غير منتهٍ من الورق مقسّمٍ إلى خلايا يمكن أن يكتبَ فيها الرمزان (0 وَ 1)، وثمة آلة قادرة على قراءةِ الرمز، والتصرّفِ بما تقرأ وفقاً للوضع الداخليّ الذي تكون فيه عند تلك النقطة، وهي تغيّر الرمز إذا كان ذلك مطلوباً، وتتحرّك في الاتجاهين إلى الخليّة المجاورة. وفي هذا التمثيل، يُشار إلى الحالةِ الداخلية بالأضواء الموجودة في طرف رأس القراءة. ويبيّن المخطَّط الأدنى استجابةً ممكنةً: فالآلةُ موجودةٌ في الحالة الداخلية التي يُشير إليها الضوء، وتقرأُ 1؛ وبالنتيجة، فإنها تُغيِّرُ 1 إلى 0، وتغيّرُ الوضعَ الداخليَّ، وتنتقل مكاناً واحداً إلى اليمين.

سنفترض أن خلايا الشريط الورقي تحمل إمّا الرقم 0 وإما 1، وأنّ الرأس، بناءً على وضعه الداخليّ، قادرٌ على قراءةِ محتوى الخلية، والكتابةِ إلى الخلية، ونقلِ خليةٍ واحدةٍ إلى اليمين أو إلى اليسار. إن آلةً معيّنةً لتورينغ تنفّذ سلسلةً من الأعمال بناءً على ما تجده على الشريط، وعلى الطريقةِ التي صُنعَ بها رأسُها

كي يستجيب، فمثلاً، إذا وَجَدتْ 1 على الشريط عندما تكون في الوضع «1»، فيمكنها تغيير «1» الموجود على الشريط إلى 0، وتغيير وضعها الداخليّ إلى الوضع «2»، والتحرّك خطوة واحدة إلى اليمين. وفي تلك الخلية قد يوجد 0. وعندما يكون الرأس في الوضع «2» ويقرأ 0، فقد يكون مبرمجاً ليتحرك خانةً واحدةً إلى اليسار، لكنه إذا قرأ 1، فإنه يغيّر 1 إلى 0 ويتحرّك خانةً واحدةً إلى اليمين. وإذا كانت استجاباتُ الرأس مصمّمةً جيداً، فيمكن عندئذٍ استعمال الآلة لتنفِّذ حتى أعقد الحسابات. إن التصميم الفعليّ للرأس واستجاباته قد تكون صعبةً جدًّا، وتكون الحسابات بطيئة جدًّا، لكننا هنا معْنيّون فقط بمبدأ الحسابات لا بفعاليّتها[14].

كل آلةٍ لتورينغ هي تنظيم خاصٌّ للشريطِ ورأسِ القراءةِ، مع إجراءٍ خاصٍّ داخلها. لنفترض أن بإمكاننا عدّ جميع آلات تورينغ الممكنة، عندئذٍ يكون لدينا مخزنٌ يحتوي على صناديق مصنّفة بالأحراف t_1، t_2، وهلمّ جرّا. وإذا لُقِّمتْ إحدى هذه الآلات بعددٍ معيَّن ثم توقفت، فسنجد عدداً معيّناً كَمُخْرَجٍ output. فمثلاً، إذا لقّمنا الآلة t_{10} بالعدد 3، فقد تُخْرِجُ العددَ 42 في نهاية الحساب. ولتلخيص هذه النتيجة، نكتب $t_{10}(30) = 42$. لكنْ قد توجد مجموعاتٌ مؤلّفة من آلةٍ وبياناتٍ (معطياتٍ) data لا يصل فيها الحساب إلى خانةٍ أبداً، كما يحدث عندما تلقّمُ الآلَةَ t_{22} بالعدد 17. ولتلخيص هذه النتيجة، نكتب $t_{22}(17) = \square$، وكانت مشكلة تورينغ تتلخص فيما إذا كان ثمة طريقةٌ لفحص جميع الآلات الممكنة ومعطياتها، والتوصّل من هذا الفحص إلى ما إذا كان الحسابُ سيصل إلى نهايةٍ.

لتنفيذ هذا البرنامج، لنفترض وجودَ آلةٍ شاملةٍ لتورينغ، وهي آلةٌ لتورينغ يمكنُ برمجتُها لتحاكيَ أيَّ آلةٍ منفردةٍ لتورينغ. لشريط المُدْخَلاتِ inputs لهذه الآلة قسمان، أحدهما البرنامج، والثاني المعطيات. وقد يكون البرنامج مؤلّفاً من

(14) يمكن العثور على محاكياتٍ لآلات تورينغ العاملة في عدة مواقع من ضمنها:
http://wapo3.informatik.fh-weisbaden.de/weber1/turing/index.html.

مجموعةٍ من الأعداد التي تصدرُ التعليماتِ إلى الرأس لتدلَّه على الطريقة التي يستجيب بها لما يجده على الشريط. مثلاً، قد يعني الكود 001 ما يلي:

001: إذا وجدتَ 1 على الشريط، وكنتَ في الوضع 1، فغيِّر 1 على الشريط إلى 0، وحوّل وضعك الداخليَّ إلى الوضع 2، وتحرّكْ خطوةً واحدةً إلى اليمين.

وبالمثل، إذا كان الكود 010، فقد يعني هذا ما يلي:

010: إذا وجدتَ 0 على الشريط، وكنتَ في الوضع 2، فانتقلْ خطوةً واحدةً إلى اليسار؛ لكنْ إذا قرأْتَ 1، عندئذٍ غيّر 1 إلى 0، وتحرّكْ خانةً واحدةً إلى اليمين.

قد يبدو جزءُ برنامجِ الشريطِ مثل ...001010... إذا نُفِّذَتْ هاتان التعليمتان بالتتابع. سنسمِّي آلةَ تورينغ الشاملةَ tu. لاحظ أنه في حين تقرأ إحدى آلات تورينغ المنفردة المعطياتِ فقط، فإن الآلة الشاملة تقرأ أوّلاً البرنامجَ لتهيّىءَ نفسَهَا، ثم تقرأُ المعطياتِ. وهكذا فإذا أردنا محاكاةَ t_{10}، فإننا نقرأ البرنامَج 10، وهو مجموعة التعليمات لإعداده للعمل مثل t_{10}، ثم نقوم بتلقيم المعطيات. وإذا كانت المعطيات مؤلّفة من العدد 3، فإننا نتوقّع الجوابَ 42 لهذه العملية المشتركة، ونكتب $tu(10,3) = 42$، حيث العدد الأيسر الموجود بين قوسين هو عدد آلة تورينغ الذي نسعى لمحاكاته، والعددُ الأيمن هو المعطيات.

لنفترض الآن أنه توجد آلة تورينغ يمكنها استيعاب أيِّ آلة أخرى لتورينغ، مثل t_{23}، وأيِّ مجموعةٍ من المعطيات، وتقرير ما إذا كانت تلك المجموعة ستتوقف أم لا، وأنها ستطبع جواباً. سنسمِّي آلةَ تورينغ الخاصّةَ هذه th (h أول حرف من كلمة halt) فإذا توقفت th لأجل مجموعة خاصةٍ من برنامجٍ ومعطياتٍ، مثل t_{23} وَ 17، فإن th ستطبع 0 وتتوقف. وكان إنجاز تورينغ يتجلّى في إظهار أن th غير محتواة في قائمة جميع آلات تورينغ الممكنة، ومن ثمّ فهي غير موجودة. وكي يفعل ذلك، استعمل محاكمةً شبيهةً جدًّا بحجّةِ

«القُطْرِ» diagonal التي استعملها كانتور ليبيّن أنّ الأعدادَ غيرَ المنطَّقةِ غيرُ عَدُودةٍ. ولابأس أن تقفزَ إلى القسم الثاني إذا أردتَ أن تتخطّى استخراجَ هذه النتيجة.

إنّ إيرادَ الحجّةِ يسير كما يلي: لنفترض أننا نستعمل المُدْخَلاَتِ inputs ...,0,1,2 عبر آلاتِ تورينغ $t_0,t_1,t_2,...$، ونرسمَ جدولاً يمثِّلُ الشكلُ التالي القسمَ العلويَّ الأيسرَ منه فقط:

رقم الآلة \ المدخل	0	1	2	3
0	□	□	□	□
1	3	□	4	1
2	1	1	1	1
3	0	1	□	2

وحيث لا يتوقّفُ الحسابُ أبداً، وضعنا □. ويتضمّن هذا الجدولُ كلَّ الأعدادِ المكنةِ القابلةِ للحسابِ (الأعداد التي يمكن حسابها بواسطة آلة تورينغ، ولها عدد كيفيٌّ من الأرقام) لأنه يتضمّن، في أسطره المتعاقبةِ جميعَ آلاتِ تورينغ المكنةِ، وفي أعمدتِهِ المتعاقبةِ جميعَ المُدخلاتِ المكنةِ.

والآن، سنقوم بإجراءٍ ثانٍ، وفي هذا المرة، ستفرزُ النتائج باستعمال th أولاً، التي نظّمناها لتُعطيَ 0 إذا قررت الآلةُ أنّ الحسابَ لن يتوقّف، وألاّ تفعلَ شيئاً للمعطياتِ إذا قرّرتْ أنّ الحسابَ سيتوقّفُ. وهي تقدِّم إشارةً لتذكّر نفسَها بالمكان الذي استعاضتْ فيه عن □ بالرقمِ 0، لأنها لا تريد أن تكونَ الآلات التي تحاكيها مجبرَةً على القيام ثانيةً بعددٍ غيرِ منتهٍ من الحساباتِ. فمثلاً، عندما نلقِّمُ 4 ثم 2 في th، وهذا يقابلُ برنامج t_4، والمعطياتِ 2، فإن th تتفحّص الشريطَ، وتجري حساباً من نفس النوع، وتقرّرُ أنّ حساب $t_4(2)$ لن يتوقّف إذا شغّلناه، ومن ثم تضع 0 في الجزء المناسب من الجدول وتقدّم مذكّرة لذاتها بأن ذلك الحسابَ الخاصّ لن يتوقفَ. وفي نهاية الحساب السابق، يصبح القسم العلويّ الأيسر من الجدول شبيهاً بما يلي:

	المدخل	0	1	2	3
رقم الآلة	0	0	0	0	0
	1		0		
	2				
	3			0	

بعد ذلك نجري الحسابات في أي مكان لم ندخل فيه 0، كما فعلنا في الاختبار الأول، وعندئذٍ نجد الجزء التالي من الجدول:

	المدخل	0	1	2	3
رقم الآلة	0	**0**	0	0	0
	1	3	**0**	4	1
	2	1	1	**1**	1
	3	0	1	0	**2**

ولما كان الجدول الأصلي يحوي جميع الأعداد الممكنة القابلة للحساب، فإن هذا الجدول أيضاً يحوي جميع الأعداد الممكنة القابلة للحساب: قد يوجد قدر كبير من التكرار، لكن لن ينجم عن ذلك أي ضرر.

الآن، نصل إلى مشكلة محيِّرة. لنأخذ الأعداد الموجودة على القطر (وهي غامقة سوداء في الجدول)، ونستعيض عنها بإضافة 1 (كما في برهان كانتور). عندئذٍ نحصل على متتالية مثل ...1123. هذا عدد قابل للحساب (لأننا نفترض أن متتالية الخطوات المستندة إلى th وآلات تورينغ تعمل في كل حالة)، لذا فإن الآلة التي تولّد ذلك العدد يجب أن تظهر في مكان ما من الجدول. لكن هذا لا يحدث: إذ إنه يختلف عن السطر الأول (لأننا أجبرنا الرقم الأول على أن يكون مختلفاً)، وهكذا الأمر في جميع الأسطر في الجدول. وهذا يعني، من ناحية، أن ...1123 يجب أن يكون موجوداً، لكنه، من ناحية أخرى، غير موجود. وهذا تناقض، لذا فالفرضية التي انطلقنا منها، وهي أنّ آلة التوقف th موجودة، يجب أن تكون غير صحيحة. وهكذا نكون قد أثبتنا (وأكّدنا أن نموذج تورينغ أكثر

دقّةً) عدم وجود إجراء خوارزميٍّ شاملٍ عامٍّ وحيد يمكن استعمالُه للحكم على ما إذا كان حسابٌ خاصٌّ سيصل إلى نهاية. وهذا، بدوره، يقتضي عدم وجود خوارزميّة عامّةٍ للفصل في المسائل الرياضية، ومن ثَمَّ للفصل في عدم وجود حلٍّ لمسألة القرار التي طرحها هلبرت.

●

لننتقل الآن إلى تمجيدٍ في هذا الفصل، لما سُمِّي أجود إنجازٍ في المنطق حدث في القرن العشرين، وهو مبرهنة غوديل Gödel's theorem. وُلِدَ عالم المنطق النمساوي كورت غوديل (1906-1978) في مدينة برون Brüm النمساوية - المجرية (التي صار اسمها الآن برنو Brno وصارت تابعة لجمهورية تشيكيا)، وفيها قام كريكور مندل بإنجازاته بعد أن درس في جامعة ڤيينا. ومع أن غوديل ليس يهوديًّا (برغم إصرار برتراند راسل على العكس)، فلم يتحمّل غوديل الاضطهاد النازيّ، وسافر إلى الولايات المتحدة عام 1934، وأصبح مهاجراً دائماً فيها عام 1940، وهناك أمضى بقية حياته في برنستون، التي كان فيها صديقاً حميماً لآينشتاين. وممّا يجدر ذكره أنه في سنواته الأخيرة، قدّم غوديل إسهاماً جوهريًّا في نظرية النسبية العامّة حين عثر على حلٍّ غير متوقَّعٍ لمعادلات آينشتاين التي سمحت للزمن بالسفر إلى الماضي. لم يكن غوديل، كما قد يُظَنُّ، تقليدياً تماماً في نظرته إلى الحياة وأسلوب حياته. فبعد عودته إلى النمسا بعد زيارته الأولى للولايات المتحدة، تزوج راقصةً مطلّقةً وأحضرها معه إلى برنستون حيث ادّعى الكثير من عَليَّةِ القوم هناك أنها لم تُسْتَقْبَلْ استقبالاً جيداً قطّ. وفي المرحلة الأخيرة من حياته، بدت عليه الأعراض التقليدية للاكتئاب والشعور بالاضطهاد: لقد كان مقتنعاً أنه ضحيّةُ مؤامرةٍ لقتله، وقد تطوّر مرضه إلى درجةٍ صار يرفض فيها الأكل، وكي يتفادى العدوى عندما كان يمشي عبر ما كان يعدّه بيئةً خطيرةً وملوثةً في برنستون، كان يضع على وجهه قناعاً. وقد مات نتيجة سوء التغذية والجوع (الإجهاد الذي نجم عن عُزُوفِهِ عن الطعام)، وقد

بلغ وزنه 30 كيلوغراماً فقط نتيجةً لذلك، وهذا ما أكدته شهادة وفاته، التي ورد فيها أيضاً أنه كان يعاني «خللاً في الشخصية».

ثمة عدّةُ مبرهناتٍ مرتبطةٍ باسم غوديل. ونحن معنيُّون هنا بمبرهنةٍ نُشرت عام 1931 ضمن مقالة عنوانها حول الدعاوى، التي يمكن البتّ فيها شكلياً، الواردة في كتاب Principia Mathematica، ونظم أخرى متعلقة بها. لقد بيّن في هذا المقالة أنه يوجد في أيّ نظام مُسَلَّمَاتِيٍّ رياضيٍّ دعاوى ماوراء رياضية meta-mathematical لا يمكن إثباتها أو دحضُها بالاستنتاجات الشكلية المستندة إلى مسلمات النظام.

هذا ما نفعله. الرياضيات متتاليةٌ من الدّعاوى، مثل 2 = 1+1، «هذا هو برهان هذه الدعوى»؛ الدعوى الأولى رياضية بمفهوم هلبرت، والثانية ماوراء رياضية. لنفترض أن بإمكاننا كتابة جميع الدعاوى التي يمكن استنتاجها من المسلمات الأساسية (من مسلمات بيانو Peano، مثلاً، أو من النظام الأعقد المبنيّ على النظرية المتشعّبة للأنماط التي استعملها راسل ووايتهيد). هذا يعطينا الدعاوى P_0، P_1، P_2، ... وهلمّ جرًّا. إن كيفيةَ البتّ في ترقيم الدعاوى غيرُ مهمٍّ، لكن الجُمَل القليلَةَ التالية ستزوّدكَ بنكهة لما فعله غوديل.

يوجد عددٌ قليل فقط من الرموز المستعملة في صوغ علم الحساب، مثل رموز بيانو. فمثلاً، إحدى مسلماته هي «التالي المباشرُ لعددٍ هو عدد». يمكننا كتابة x^1=sx حيث يعني s «التالي المباشر لِـ»، لذا فإن so = 1، 2 = ss0 = s1، وهكذا. وقد خصّص غوديل أعداداً لكلّ إشارةٍ ابتدائيةٍ في عبارةٍ. لنفترض أنه خصّص 5 للإشارة «=» و 7 للإشارة s. خُصِّصَ لكلّ متغيّر متميّز عن غيره، مثل x^1، عددٌ أوّليٌّ وحيدٌ أكبرُ من 10، لذا نخصص لِـ x العدد 11، ولِـ x العدد 13. عندئذٍ يكون عدد غوديل Gödel number لدعوًى هو حاصل ضرب جميع الأعداد الموافقة للرموز التي يحويها، ومن ثم فدعوانا بأن x^1 = sx مخصَّصٌ لها القيمةُ 13 (لِـ x^1) × 5 (لِـ =) × 7 (لِـ s) × 11 (لِـ x)، وهذا يساوي 5005. لاحظ أنه وفق هذا الإجراء، فإن دعوًى ما، تضمّ مسلمةً للشكلية

formalism، تصبح عدداً وحيداً[15]، لذا فإن العلاقات بين الدعاوى تصبح علاقات ضمن الحساب. وعلى سبيل المثال، يمكننا الإجابة عن المسألة الرياضيّة عمّا إذا كانت هذه الدعوى تحدث في دعوى أطول وأعقد عن طريق استنتاج ما إذا 5005 عاملاً لعدد غوديل للدعوى المركبة، تماماً مثلما يكون 5 عاملاً للعدد 75.

سنعلّم الدعاوى باستعمال عدد غوديل الخاص بها، لذا فالدعوى $x^1 = sx$ المتعلقةُ بالعدد 6 (التي تُقْرَأ بالشكل $s5 = 6$، «أي 6 هو العدد التالي المباشر للعدد 5») هي الدعوى $p_{5005}(6)$. وكما قد تتوقع، فأعداد غوديل للدعاوى المعقّدة كبيرةٌ جدًّا، لكننا سنزعم فيما يلي أن بإمكاننا التعاملَ مع أعدادٍ صغيرةٍ مثل $p_1(6)$ وَ $p_2(4)$ دون أن نتعرض لعواقبَ ضارّةٍ. فمثلاً، يمكننا الزعم بأن الدعوى 4، أي p_4، عندما تُطبَّق على العدد 6، هي الدعوى الرياضية «6 عددٌ تامٌّ» (وهو العدد الذي يكونُ مجموعَ عوامله الأوّليّة، وفي هذه الحالة، تضم هذه العوامل 1، كما في $1+2+3 = 6$ وَ $1x2x3 = 6$) وبأن الدعوى 5 قد تكون متعلقةً بالأعداد الأوّلية، ويمكننا أن نقرأ $p_5(11)$ بالصيغة «11 عدد أوّليّ».

يتكوّن البرهان الرياضيّ من مجموعةٍ من الدعاوى التي يُستنتَجُ بعضُها من بعض بواسطة تطبيق قواعد المعالجة بالرموز. يعني هذا أن بإمكاننا إسنادَ عددٍ وحيدٍ لبرهانٍ كلِّيٍّ بملاحظة أعداد غوديل لجميع الدعاوى التي يحتويها ذلك البرهان. فإذا كان برهانٌ مؤلفاً من ثلاث دعاوى، حيث أعداد غوديل هي 6 وَ 8 وَ 2 (وعمليًّا، هذه الأعداد كبيرة جدًّا)، فإنه يُسنَدُ إلى البرهان الإجمالي عدد غوديل $2^6x3^8x5^2 = 10\ 497\ 600$ (وفي البراهين التي هي أطول، تستمر الأعداد 2، 3، 5 كأعداد أولية). وكما قد تتصور، فإن كبر أعداد غوديل للبراهين الطويلة للدعاوى المعقدة هي بمرتبة كبر الأعداد الفلكية[16]. ومرةً أخرى، فالمهم في هذا الإجراء هو أن البراهين الكلية يمكن

(15) بغية التبسيط، خفّضْتُ إجراء الترقيم إلى النقطة التي لا تنجح فيها تماماً، وذلك يعود جزئياً إلى أن الترتيبَ التي تتبعه الرموز غير مأخوذٍ في الحسبان. كان إجراء غوديل أعقد من ذلك.

(16) في الرياضيات الفومتناهية ultrafinistic، حيث لا تنجح الأعداد، فقد تكون أعدادُ غوديل للبراهين المعقدة كبيرةً جدًّا إلى درجةٍ تفقد فيها هذه الأعدادُ معناها.

إدخالها في ميدان علم الحساب. ويمكننا استعمال الإجراءات الحسابية، مثلاً، للحكم على ما إذا كان برهانٌ ما يستفيد من براهينَ أخرى بتحديد ما إذا كانت أعدادُ غوديل لتلك البراهين هي عواملَ لعددِ غوديل للبرهان المعطَى، مثلما تحدّدُ $5x3 = 15$ أنّ 5 وَ 3 عاملان للعدد 15.

سنستعمل الآن أعداد غوديل هذه لاستخراج نتيجة غوديل في شكل مختلف عن إجراء كانتور ومناقشة تورينغ لقابلية الحساب computability. وفي الحقيقة، فقد استعمل غوديل أسلوباً أعمق بكثير أسفر عن إثبات أربعين مبرهنة قبل وصوله إلى ذروة برهانه. وما سنورده الآن يتناول جوهر ما أورده: فَكِّرْ فيه بأنه ركوب طائرة هليوكبتر (مروحية) إلى الذروة. بيد أنه لما كان البرهان صعباً، حتى لو بسّطناه إلى الدرجة التي أنوي اعتمادها، فأنت حرٌّ في القفز إلى النقطة المناسبة لاستئناف قراءتك.

لنفترض أننا نقدّم دعوًى معينةً عن العدد 0، ولْنُسَمِّ هذه الدعوى $p_0(0)$، كما تقدّم نفس الدعوى عن العدد 1 سنسميها $p_0(1)$، وهلمّ جرّا، وعموماً فسنعني بالرمز $p_0(x)$ دعوى تتعلق بـ x. قد تكون هذه الدعاوى صحيحة أو خاطئة. فمثلاً، قد تكون الدعوى هي «الجذر التربيعيّ لِـ x هو 1»، وفي هذه الحالة تكون $p_0(0)$ خاطئة لأنها تدّعي أن $1 = \pi 0$، وهذا خطأ، لكن $p_0(1)$ صحيحة لأن $\pi 0 = 1$. ولكلٍّ من هذيْن الدعوييْن عدد غوديل خاصٌّ بها يمكننا استنتاجه، ثم إن هناك عدداً غير منتهٍ من مثل الدعاوى بخصوص كلٍّ من الأعداد الطبيعية غير المنتهية. نكتب هذه الدعاوى بالأشكال $p_0(x)$، $p_1(x)$، وهلم جرًّا؛ بعضها خاطىء، والبعض الآخر صحيح. سنرتب الآن كلَّ أعداد غوديل الموافِقَةِ في جدولٍ ضخمٍ (ولهذه الأعداد قيمٌ فلكيّةٌ في الأمكنة التي استعملنا فيها أعداداً صغيرةً). إن القسم العلويّ الأيسر من هذا الجدول قد يكون شبيهاً بالتالي:

الدعوى \ المدخل	**0**	**1**	**2**	**3**
0	**1**	55	27	4
1	51	**3**	7	17
2	0	20	**30**	40
3	13	22	11	**2**

حيث كلُّ عددٍ في الجدول هو عدد غوديل (المزيَّف) للدعوى الموافقة. وهكذا فإن عدد غوديل المزيّف للدعوى p_3 المتعلقة بالعدد 2 هو 11.

والآن سننشىء، على نحوٍ منفصل، جدولاً يحوي أعداد غوديل لجميع الدعاوى التي يمكن إثباتها استناداً إلى مسلّمات النظام. وكما افترضنا وجود آلةٍ لتورينغ للحكم على ما إذا كان الحساب سيتوقّف أم لا، فنحن نفترض أن مثل هذا الجدول يُمكن إنشاؤه، لكنْ إذا وقعنا في تناقضٍ، فعندئذٍ يتعيّن علينا رفض الافتراض.

الآن، وكما فعلنا في الحجج التي قدّمها تورينغ، سنَدخُلُ في الموضوع. لننظرْ في الدعوى:

إن عدد غوديل لهذه العبارة القطرية غير موجود في جدول القضايا القابلة للبرهان.

«العبارة القطرية» هي دعوى تتعلق بالعدد الخاص بتلك الدعوى، كالدعوى p_2 المتعلقة بالعدد 2. ولما كانت هذه القضيةُ دعوىً، فيجب أن تحدث في مكانٍ ما في الجدول الشامل للدعاوى. وبغية التبسيط، لنفترض أنه تَبَيَّن أنها الدعوى 2. وإذا كان الأمر كذلك، لننظرْ في عدد غوديل القطري المقابل، الذي هو في هذه الحالة 30. ويقابل عدد غوديل الدعوى بأنه:

لا يوجد برهانٌ على الدعوى 2 المتعلقة بالعدد 2.

وهذا يوصلنا إلى نتيجةٍ محيّرة. لنفترض أننا نعرف بعد الرجوع إلى الجدول

الكامل للدعاوى القابلة للبرهان أن هذه الدعوى، صحيحةٌ فعلاً، بمعنى أنّ من الممكن البرهان على عدم وجود برهانٍ على الدعوى 2 المتعلقة بالعدد 2، عندئذٍ لا توجد في جدول الدعاوى القابلة للبرهان! وإذا افترضنا، بدلاً من ذلك، أن الدعوى بعدم وجود برهانٍ على الدعوى 2 المتعلقة بالعدد 2 غيرُ صحيحةٍ، فإننا نقع أيضاً في تناقض، ذلك أنه لو لم يوجد برهانٌ على أن الدعوى 2 المتعلقة بالعدد 2 خاطئة، عندئذٍ لن تكونَ موجودةً في جدولِ الدعاوى القابلة للبرهان، وفي هذه الحالة تكون الدعوى صحيحة!

لقد وصلنا إلى النقطة التي يتعيّن علينا فيها الاستنتاج بأن نظام المسلّمات الذي نستعمله لا يكفي لإصدار قرارٍ بصحّةِ الدعوى أو نفيها. الرياضيات غير تامة. يعني هذا وجودُ عددٍ غيرِ منتهٍ من القضايا الرياضية التي يُحتمل صحتها، لكنْ لا يمكن استنتاجها من مجموعةٍ معطاةٍ من المسلّمات. وهاكم الأساسَ لإحدى ملاحظاتي الافتتاحيةِ. ليس المذهلُ فقط هو أنّ بمقدورنا القيامَ بالعدّ (لأن الأعداد الطبيعية نادرة جدًّا في عالم الأعداد كلِّها)، بل المذهل هو أنْ يكونَ بوسعنا إنجازُ أيِّ عملياتٍ حسابيةٍ عليها (لأن العبارات القابلة للبرهان، شكليًّا، نادرةٌ جدًّا).

لا تعني نتيجةُ غوديل حلولَ يوم القيامة للرياضيات. فأولاً، قد توجد طرائقُ غيرُ خوارزميّةٍ لإثبات صحة قضيةٍ ما، تماماً مثلما قد يكون من المستحيل البرهان، شكليًّا، على أن وضعاً معيناً في لعبة الشطرنج لا يمكن أن يُؤدي إلى موت الشاه، لكن يمكن تصوّر ذلك في إطارٍ أشمل. يعني هذا أنه قد يوجد برهانٌ رياضيٌّ لتوكيدٍ لا يمكن البرهان عليه دون النظام الشّكلي. إن كون العقل البشريّ قادراً على تقديم مثل هذه البراهين الشكلية، لكن الموثوقة تماماً، يُعَدُّ نافذةً يُطلُّ منها على طبيعة الوعي، لأن ذلك يبيّن أن الإدراك والتأمّل ليسا خوارزميَّيْن بالضرورة.

مرّت الرياضيات بثلاث أزماتٍ كبرى في تاريخها. كانت أولاها اكتشافَ اللاقياسيّة (اللاتناسب) incommensurability من قِبَلِ اليونان، وهي وجود الأعداد غير المنطَّقة واستبعادها من فلسفة الفيثاغوريين. الأزمة الثانية هي بروز حساب التفاضل والتكامل calculus في القرنِ السابع عشر، الذي رافقه الخوف من أن التعامل مع اللامتناهيات في الصغر infinitesimals كان أمراً غيرَ مشروعٍ. وكانت الأزمةُ الثالثةُ مقابلةَ التناقضات، مثل متناقضة راسل ومحيِّرة بيري في صدر القرن العشرين، والتي بدتْ وكأنّها ستقضي على أسس الرياضيات. وبمعنًى، من المعاني، فإنه لمّا يثير الدهشةَ أنّ الرياضيّات بقيت واستمرت بوصفها فرعاً من فروع المعرفةِ. وقد حدث ذلك جزئيًّا بسبب وجود قدرٍ كبيرٍ من الرياضيات الرائعة التي يبدو أنها تؤدي عملَها بأسلوبٍ جيد تماماً، ومن الحماقة نبذ موضوعٍ بلغ مثل هذا المستوى من النجاح، حتى لو وُجِدَتْ مناطقُ داخلَ بنيته تعاني خللاً شديداً. ويستطيع الرياضيون العاملون متابعة بحوثهم دون خوفٍ ودون إيلاء اهتمامٍ يُذْكَرُ بالثّغرات العميقة الموجودة في أسس الرياضيات، التي يفترضون أنّ من غير المحتمل أبداً أن تمسَّ هذه الثغراتُ جوهرَ تطبيقاتهم الحقيقيةِ للرياضياتِ. السبب الثاني، بالطبع، هو أن الرياضيات مفيدة جدًّا وهي اللغة السامية المستعملةُ لوصف العالَم الماديّ. فإذا ذهبتِ الرياضياتُ، ذهب معها معظمُ العلوم والتجارة والمواصلات والصناعة والاتصالات.

وهنا يُطرح السؤالُ عن السبب في أن الرياضياتِ، التي هي نتاجٌ عبقريٌّ للفكر الإنسانيّ، ملائمةٌ ملاءمةً رائعةً لوصف الطبيعة. وهنا سوف أُطلق العنانَ لخيالي ليقوم برحلةٍ شخصيةٍ ممتعةٍ، هي مجرد تخيُّلٍ صِرْفٍ ليس له أساسٌ علميٌّ، ومن ثَمَّ فهي تفتقر كليًّا إلى الإثبات. سأفترض أنني يوناني (من قدماء اليونان) وأنني أؤمن بمذهب كانط جوهريًّا، برغم تهكّمي، إلى حدٍّ ما، على فلاسفتهم. وهنا، أنوي إقصاء اليونان عن يونانيتهم، وأرى ما إذا كنتُ غيرَ قادرٍ على إقصاء كانْط عن كانط، واستكشاف ما إذا كان ثمة رابطةٌ عميقةٌ بين الواقعية الأفلاطونية، والحدسية البراورية Brouwerian، والشكلية الهلبرتية.

المشكلة التي تواجهنا شعبتان. الشعبة الأولى هي أنّ الرياضياتِ هي النتاجُ الداخليُّ للعقل البشري. الشعبة الثانية هي أن الرياضياتِ تبدو أنها تتكيّف تكيّفاً رائعاً مع وصف العَالَمِ الماديِّ الخارجيِّ. فكيف يتلاءم الداخليُّ جيداً مع الخارجيِّ؟ إذا اعتمدنا نظرة كَانْتْ إلى الدماغ، فيمكننا الافتراضُ أنه تطوّر بطريقةٍ تجعله قادراً على تمييز المجموعات المقابلة للأعداد الطبيعية (وهي استنتاجية تركيبته، بكلمات كانْط)، وعلى تقديم تلك الأعداد بثلاثة أبعاد على شكل هندسة (استنتاجية تركيبيّة، أيضاً، لكن موضعيًّا فقط، لأننا نعرف أن الهندسة الإقليدية غيرُ صحيحةٍ عندما تكون المسافاتُ كبيرةً جدًّا، وفي جوار الأجسام الضخمة). وفي يومٍ متأخر، قد يؤكّد كانْط أننا نعاني مشكلاتٍ في التفكير في الأعداد غير المنطّقة، وفي الهندساتِ غير الإقليدية، لأن هذه المفاهيم ليست مرتبطة بقوة بشكبتنا العصبية عبر نوعٍ ما من التكيّف التطوريّ مع البيئة المحلّيّة، وأنه يتعيّن علينا بذل جهد فكريٍّ حقيقيٍّ للتأمّل في خاصيّاتها.

وإذا تابعنا مسيرتنا، فيمكننا الافتراضُ أيضاً أن المعالجاتِ البسيطةَ لهذه المفاهيم موجودةٌ بُنيويًّا في الترابط القويِّ لأقسام الدماغ. وتوحي هذه الفكرة بأن المعالجات المنطقية الضمنية الأساسية مبنيةٌ من داخل الدماغ، وأننا نملك طاقة خوارزمية مترابطة بقوة. أنا لا أقول أن هذه هي الطاقة الوحيدة للدماغ: إذ يوجد حاليًّا اهتمامٌ بالغٌ بالافتراض التأمليّ بوجود نشاطات غير موضعية للدماغ تمكّننا من النظر في علاقاتٍ بطريقةٍ غيرِ خوارزميةٍ، وقد خمّن البعض (روجر پنروز R. Penrose الذي يعد من كبار مؤيّدي هذه الفكرة) بأن الوعيَ هو ظاهرةٌ كموميّةٌ غيرُ موضعية جوهريًّا. هذا وإنني سأُفَاجَأُ إذا صحّ ذلك، لكنني سأظل مركِّزًا على العملياتِ الخوارزميّةِ في الدماغِ، أيْ على المعالجِ المشاركِ co-processor الخوارزميّ الهلبرتيِّ لقدرةٍ أكبر، وأقوى رياضيًّا، وربّما غير محلّيّة، للدماغ. واختصاراً، فبغية إجراء الحسابات الخوارزمية، يمكننا اتّخاذُ ما يمكن تسميتُه موقفاً «بنيويًّا»، يعكسُ رؤيةَ نعوم تشومسكي N. Chomski للقدرة البشرية الفطريّة على اكتساب اللغة، والتفكيرُ في قدرتِنا المنطقية بوصفها إثباتاً كانطيًّا Kantian لمركّبةٍ خوارزميّةٍ شديدة الترابط للدماغ برزتْ نتيجةً لضغوطِ التطوّرِ،

وإن قدرتنا على إبداع علاقات رياضية، واستنتاجِ المبرهناتِ، وغيرِ ذلك، هي نتيجةٌ لتلك البنية.

وعند تحرّكنا خارج الرأس، فيتعيّن علينا الآن النّظر في سبب كونِ العَالمِ الماديّ في متناولِ قفّاز الرياضيات. لقد سبق ورأينا علاقةَ الأعداد بالمجموعات، وتعريفَ مزيج للأعداد بأنها مُمَدَّدَاتُ مجموعاتٍ معينةٍ. وبنفس هذه الروح، فإن الرياضيَّ المجري - الأمريكي المرح جون (يوهان) فون نيومان J. Von Neumann (1903-1957)، الذي يُعتبر، معْ تورينغ، أَب الحاسوبِ الحديثِ، رأى أنّ من الممكن تعريفَ الأعدادِ الطبيعيةِ بأنها مجموعاتٌ معينةٌ بسيطةٌ جدًّا، وتحديداً، فقد عرّف 0 بأنه المجموعةُ الخالية {}، وهي المجموعة التي لا تحتوي على عناصر. ثم تابع معرّفاً 1 بأنه المجموعة التي تحوي المجموعة الخالية أي {{}}=1، وَ 2 بأنه المجموعة التي تحتوي على كل من المجموعة الخالية والمجموعة التي تحوي المجموعة الخالية أي 2={{}, {{}}} ، ثم 3 ={{}, {{}}, {{{}}}}، وهكذا[17]. وهكذا فقد ملأ فون نويمان العالَمَ بالأعداد من العدم تماماً، ومنحنا حساباً من العدم ex nihilo.

وفي مكانٍ آخر، قَدَّمْتُ الحجةَ على أنه لمّا كنتُ أفتقر إلى الخيال لأرى كيف أنّ شيئاً ظاهراً يمكن أن ينشأ من العدم المطلق، فإن نشوء العالَمِ من العدم يجب أن يكونَ تماماً مثل استحضارِ فون نويمان للأعداد الطبيعية من المجموعة الخالية. والحقيقةُ القائلةُ بأن العالَمَ خُلق من لا شيء يجب عندئذٍ تفسيرها بوصفها دلالةً على أن الكينونات التي أتتْ إلى الوجود بهذه الطريقة منسجمةٌ ذاتيًّا self-consistent منطقيًّا، لأنه إذا لم نقبل بذلك، فإن العالَمَ سينهَار. لذا ثمة بنيةٌ منطقية جوهرية للعالَم، الذي له نفس بنية علم الحساب.

نحن نقوم الآن بضم هذه الجداول المتدفقة من التخمينات بعضها إلى بعض. وعندما تواجهُ الرياضياتُ العالَمَ الماديُّ، فإنها ترى الطريقَةَ التي تتأمله

(17) برغم أناقة هذه الرموز، فإنها مربكة. وفي نظرية المجموعات، يُرمز عموماً إلى المجموعة الخالية بالشكل Ø، لذا فالأعداد الطبيعية هي: Ø، {Ø}، {Ø، {Ø}}، {Ø، {Ø}، {Ø، {Ø}}} .... وهذه، من الناحية الرمزية، على الأقل، أقل إرباكاً بقدر ضئيل جدًّا.

بها. إن لأدمغتنا، وللرياضياتِ التي أنتجتها، نفسَ البنيةِ المنطقيّةِ التي يتّسم بها العالَم الماديّ نفسُهُ، وهي بنيةِ الزّمكانِ والكينوناتِ التي تسكنُهُ. لذا فلا عجب، كما يرى ويغنر Wigner وآينشتاين، أن تكونَ الرياضياتُ، التي ولّدها الدماغ، لغةً مثاليةً لوصف العالَم الماديّ.

ربما كان كلُّ ذلك هراءً. لكنْ لنفترضْ أن الأمر ليس كذلك، عندئذٍ سيكون أحدُ الاقتضاءاتِ أنّ البنيةَ الجوهريَّةَ للعالَمِ هي الرياضيات: فكل ما يحتويه العالَمُ هو الرياضيات، ولا شيء غير الرياضيات، أمّا الحقيقة المادية فليست سوى مظهراً للرياضيات يُوقِعُ في النّفسِ شيئاً من الرهبة. هذه أفلاطونيةٌ مفرطةٌ، أسميتُها في مكان آخر «بنيوية عميقة» deep structuralis. ما يبدو لنا أنه محسوسٌ ـ التراب، الهواء، النار، الماء ـ ليس سوى علم الحساب. وإذا كان الأمر كذلك، فإن مبرهنة غوديل تسْرِي، بمعنًى من المعاني، على الكون كله. لا يمكننا البتّة معرفة أن العالَمَ منسجمٌ ذاتيًا حقًّا. وإنْ لم يكن كذلك، فقد ينتهي فجأةً في لحظةٍ ما من المستقبل، أو ربّما ينتشر عدم الانسجام عبر بنيته كانتشار الطاعون، وهذا يفنّد المنطق السائد ويلغي البنيةَ مثلما يقضي الصدأُ على الحديد. وكلُّ ما هو موجود سيعود إلى حيث بدأ، إلى المجموعة الخالية، إلى المفهومُ الذي يتّسم بفعالية مذهلة، ألا وهو مفهوم العدم المطلق.

وفي نفس الوقت، فإن تلكَ الفعاليّةَ هي فعاليتُنا التي يجب أن ننعم بها. وكلُّ ما حولَنَا، إذا كان لهذه الرؤية أيُّ مشروعيّةٍ، هو تشعّباتٌ رهيبةٌ للعلوم، الذي نكتشفه عن طريق حواسِّنا، وتتعمّق بهجةُ حواسِّنا بواسطة فكرٍ يشحذه العلم، الذي هو سليل رؤيةِ غاليليو وإصبعه. ولا يمكنني التفكيرُ في أي شيء أكثر حركةً، وأكثرَ روعةً من هذه الإصبع.

خاتمة

مُسْتَقْبَلُ الفَهْمِ

إلى أين يوجِّهُ غاليليو إصبعَهُ ليشيرَ به إلى مستقبلِ الفهمِ؟ إن التقدّمَ الرائعَ الذي أُنْجِزَ خلال القرونِ القليلةِ المنصرمةِ، وبخاصةٍ خلالَ القرن العشرين، لا يَحْمِلُ علاماتٍ على خمودٍ في سرعةِ هذا التقدّمِ. تُرَى، إلى أين يقودُنا إذن؟

يبدو العِلْمُ وكأنّه قد يكون غيرَ منتَهٍ إلى حدٍّ ما. أنا أعني بهذه العبارة، التي اخترتُها بحذرٍ، أنّ للمتفائلِ سبباً محدَّداً للتوقّعِ بأن البحثَ عن نظريةٍ نهائيةٍ، تُسمَّى «نظريةَ كلِّ شيءٍ» theory of every thing، سيتوصَّلُ إلى نتيجةٍ ناجحةٍ، لكنْ تشعُّبَاتِ العلمِ وتطبيقاتِهِ ليسَ لها حدودٌ. بَيْدَ أنّ الأمورَ اختلفتِ الآن، إذْ إن المتفائلين - التفاؤل سمةٌ مميَّزةٌ يجب أن تَطْبَعَ شخصياتِ العلماءِ عامةً - قادرون على تحديدِ الفرقِ الأساسيِّ بين علماءِ أواخرِ القرن التاسع عَشَرَ وعلماءِ القرنِ الحادي والعشرين.

فَعَالِمُ القرنِ التاسع عشرَ، الذي نشأ في عالَمٍ كان يتزايدُ فيه تعقيدُ الأدوات من جميع المقاييس، بدءاً من الأدواتِ البالغةِ الصِّغَرِ وُصولاً إلى أخرى تتَّسِمُ بضخامةٍ هائلةٍ، رأى التفسيرَ بصِفته أداةً gadget. وفيما يتعلق بهؤلاء العلماء، فإن الأرض الموعودةَ للوصول إلى الفهمِ المطلقِ كانت تتجلّى بإنشاء آلةٍ لا تستطيع ملاحظاتُهُمْ مجاراةَ ما تقدّمه تلك الآلَةُ، لأنهم كانوا قادرين على صناعةِ الأدواتِ. وتجدر الإشارةُ إلى أنّ هذه الفكرةَ لم تَخْتَفِ تماماً من العلْمِ الحديثِ، كما سنرى في وقتٍ لاحقٍ، لكنّ العلماء يقبلون الآن أن التفسيرَ بوصفه أداةً فكرةٌ ساذجةٌ لنهاية الفهم. فأيّ أداةٍ هي نفسها مؤلّفةٌ من أدواتٍ ذاتِ مقاييسَ أصغرَ فأصغر، وفي الحقيقة، فأيّ شيء يمتلكُ خاصِّيَّاتٍ هو أداةٌ مركَّبة. فالإلكترون، الذي له كتلةٌ وشحنةٌ ودورانٌ، هو أداةٌ بهذا المعنى، وهو يتّصف ببنيةٍ مفترَضَةٍ تمنحه هذه السّماتِ المميِّزَةَ الأساسية.

وقد انتقلنا من عصر الأدواتِ هذا إلى عصر التجريد. ويعتقدُ علماءُ القرن الواحد والعشرين حاليًّا بأنه لا يمكن التعبير عن البنية الجوهرية للكونِ إلاّ بالرياضيّات، وأنّ أيَّ محاولةٍ لربطِ الرياضيّاتِ بالنماذجِ التي يمكن تخيّلُهَا محفوفةٌ بالمخاطرِ. التجريد هو الآن اسم اللعبة، وهو النموذجُ الحاليُّ للفهم. كل نظرية نهائية، إنْ وُجِدَ مِثْلُ هذه النظريةِ، يُحتمل أن تكونَ وصفاً مجرّداً صِرْفاً للبنيةِ الأساسيّة للعالَم، وصفاً قد نملكه دون أن ندركه.

من المحتمل أن تكونَ هذه الفكرةُ ـ التي مفادها أنه قد يكون بمقدورنا امتلاكُ تفسيرٍ، دون أن نستوعبَهُ ـ بالغةَ التطرُّفِ. فالبشر ماهرون في تفسيرِ الرياضيّاتِ، وبخاصةٍ الرياضيات المستعملة في علم الفيزياء، باستعمال مصطلحاتٍ مألوفةٍ، وهم يَعُونَ دوماً أن تفسيرهم محفوفٌ بالمخاطر وبعدم الكمال، لكنه يظلّ تفسيراً على كلِّ حالٍ. وهكذا يمكن تصوُّرُ تدويم spin الإلكترونِ ذهنيًّا بأنه كرةٌ تدورُ، لكننا نعرف أن «التدويم» هو في الحقيقة شيءٌ بالغ التجريد، وأن سماتِهِ المميِّزَةَ لا يمكنُ استيعابُهَا تماماً بهذه الصورة الكلاسيكية. وأكثرُ من ذلك، فإنّ سماتِ هذه الصورةِ المجردةِ مدعاةٌ للتضليل. وتوفّر نظرية الأوتار string theory مثالاً آخرَ، حيث نتظاهر بأنه يمكننا استيعاب ما نعنيه عن طريق المفهوم الرياضي للوتر بعدة أبعاد، وذلك باعتبارِ هذا المفهومِ وتراً حقيقيًّا يهتزّ في ثلاثةِ أبعادٍ. ومع أن النظريّةَ النهائية قد تكون جِدَّ مجرّدةٍ، فيمكننا التوقّعُ أن نحصلَ على صورٍ مألوفةٍ ومُوحيةٍ وغيرِ دقيقةٍ لمضمون النظرية، وأنه سيوجَدُ عددٌ لا ينتهي من الكتب في المستقبل، التي يكتبها مؤلفون متخصّصون في تبسيط العلوم ليفهمها سواد الناس، وأنّ هؤلاء المؤلفين سيجدون طرائقَ جديدةً لجعل النظريات المستقبليّةِ النهائيةِ قابلةٍ للهضم.

لكنْ ما الذي نعنيه بمصطلح «النظرية النهائيةِ»؟ لن تكون النظريةُ النهائيةُ معادَلةً وحيدةً، ما إن تُحَلَّ حتى تُفَسَّرَ كلُّ خاصِّيَّةٍ ونشاطٍ يجريان تحت الشمس، بل في الشمس ذاتِها. النظريةُ النهائيّةُ هي مجموعةٌ معقّدةٌ لمفاهيمَ تُجَسِّدُ بمعنًى من المعاني ـ وهنا لا يمكنني أن أكون صريحاً، لأن الصراحة يجب ألاّ تَحْدُثَ إلا بمرافقةِ الإدراك المتأخِّر لموضوعٍ ـ موقفاً يُتَّخَذُ تُجَاهَ البنيةِ الأساسيّةِ للعالَمِ

المادّيّ. ولإعطائك فكرةً لما يدورُ في خَلَدِي، بوسعي الإشارةُ إلى المحاولَة الفاشلَة، لكنِ البارعةَ، التي قام بها شخص بارعٌ بامتياز هو جون ويلر J. Wheeler، الذي فكّر قبل نحو نصفِ قرنٍ فيما إذا كان جوهرُ الحقيقيةِ المطلقةِ هو مجموعةً من دَعَاوَى statements المنطق الخبريّ predicate logic: من هذه الدعاوى: هل كان للعالَمِ أن يوجَدَ لو أن دعاوى عشوائيةً للمنطقِ اصطدمَتْ مع الانسجام الذاتيّ self-consistency؟ وهل كان الانفجار العظيم Big Bang دَفْقَةً ليصبحَ العالَمَ منطقيًّا منسجماً ذاتيًّا؟ وبعبارةٍ أخرى، هل كان للخَلْقَ أن ينشأَ من إدراكِهِ الذاتيِّ المحتَملِ لنفسِهِ؟

وبالطبع، فإنّ هذا المستوَى من الوصفِ أدنى وأعمقُ من ذلكَ الوصف الذي نسعى حاليًّا إليه بدلالة الأوتار، وتوحيد النظريةِ الكموميّةِ والثقالةِ. وإذا كان الماضي هو مرشدَنَا، فيمكننا أن نكونَ واثقين بأنه سيوجد، على الأقلّ، انتقالَيْن عميقَيْن وهامَّيْن للنماذجِ بين ما هو موجودٌ الآن، وبين إنجاز النظريةِ النهائيةِ. ومن الممكن، بالطبع (وإن القيِّمين على السجلاّتِ والمحفوظاتِ في المستقبل، إذا كانت لديهم القدرةُ على قراءة كتبنا المطبوعةِ، فإنهم سيضحكون من سذاجة هذه الكلمات) أنْ نجهد في الوصول إلى سلسلةٍ غيرِ منتهيةٍ من انتقالاتِ النماذجِ، وأنْ يظلّ الفهمُ الحقيقيُّ موجوداً على طول طريقٍ من الآجُرِّ الأصفر فوق الأفق النموذجيّ التالي. قد يَسُرُّ هذا الفلاسفةَ، الذين هم متشائمون بطبعهم، والذين سَيُسَرُّونَ من العلم الذي يسير بخطىً متعثِّرةٍ، لكنّ هذا سيولِّد إحباطاً لدى العلماء الذين يجب أن يكونوا مجبولين على التفاؤل.

سينشأ أحد الانتقالات في النماذج من توحيد التثاقل والنظرية الكوانتية، وثمة علاماتٌ على الصيغة التي يُحتمل أن يأخذها. وكما ذكرنا في الفصل 9، فهناك فكرة آخذة في البروز مفادها أنّ السّماتِ الحقيقيةَ الوحيدةَ للزّمكانِ هي وجودُ علاقاتٍ بين الأحداث. ثمة، أيضاً، تأويلاتٌ عميقةٌ للنظرية الكوانتية، تذهب إلى أن جميع الأحداثِ الماضيةِ المحتملةِ حدثَتْ، ومن ثَمَّ فالكون، جوهريًّا، متعدِّدُ الصّفحاتِ multi-sheeted. لم نُحدِّدْ بَعْدُ تماماً مثلَ هذه الانتقالات في النماذج، وهي مازالت خاضعةً لاعتراضاتٍ تقنيّةٍ، ذلك أننا لا نملك بَعْدُ جاذبية كوانيّةً كاملةً؛

بيد أنه ما من شكٍّ في أنها ستغيّر فهمنا للحقيقة على نحوٍ يوقِعُ في النّفسِ الرّعبَ والذّهول، مثلما غيّرت النسبيّةُ الخاصّةُ فهمَنا، وكذلك النسبيّةُ العامّةُ أيضاً، ومثلما فعلتِ النظريةُ الكوانتيةُ نفسُهَا ومازالت تفعل ذلك. وفي الحقيقة، فإذا فكّر المرءُ بالسِّمَاتِ المميِّزةِ للقرن العشرين، فلن يقتصرَ على رؤية الجيشان الذي حدث في النظام الاجتماعيّ (والقرنُ العشرينُ ليس الوحيدَ الذي حدث فيه ذلك)، لكنه يرى أيضاً أن جيشاناً عميقاً، لم يحدث مثيلٌ له منذ كوبرنيك، جرى في فهمنا لنسيج الحقيقة. لم تنجزِ الفلسفةُ قطّ مثلَ هذا الجيشان برغم مرور آلاف السنين على نشاطها؛ لكن العلم أنجزهُ ثلاثَ مراتٍ على الأقل في مئةِ سنةٍ، وسينجزه مرة أخرى في الأقل، وربما مرتين، وقد يتكرّر ذلك في متسلسلةٍ لانهاية لها.

هذا وإن الانتقال الثاني في النماذج ـ الذي سنفترض أنه سيكون الأخير، لكنْ لا يمكن معرفة ذلك ـ سيأخذنا خطوةً وراء توحيد النظرية الكوانية والجاذبية. إنه سيأخذنا إلى أسسِ الحقيقة الفيزيائية، وسندرك آنذاك ما الذي يعنيه أن يكون شيءٌ جُسَيْماً، وما الذي يعنيه أن يكون قوّةً، وما الذي يعنيه أن يملك شحنةً، وكيف تنشأ القوانينُ الفيزيائيةُ، ولماذا كان العالَمُ على النحو الذي هو عليه، وكيف يمكن للحقيقةِ الجليّةِ أن تنشأَ من لا شيءٍ على الإطلاق دون تدخُّلٍ... ثم يتبيّن أنّ من الممكن استيعابها. ما مِنْ أَحَدٍ يملك أدنى فكرةٍ عن الصيغة التي ستّتخذها النظريةُ النهائيةُ، برغم وجود وَمَضَاتٍ ضعيفةٍ لاحتمالاتٍ متعدّدةٍ في نظريةِ الأوتارِ، موجودةً في تخميناتٍ كتلك التي جاء بها ويلر Wheeler، وفي تخميناتٍ خياليّةٍ ٱلْمَحْتُ إليها في نهاية الفصل 10. كلُّ ما يمكننا أن نكون متوثقين منه هو أنه عندما يأتينا الإلهام الأخير. فسنصاب بالدهشة من سذاجتنا السابقة.

ثمة مسألتان فقط عميقتان حقًّا تُرِكَتَا للعلْم كي يحلّهما، علماً بأنه يوجد ملايين من المسائل من المرتبة الثانية في أهميتها، وعددٌ لا يُحصَى من تريليونات المسائل من مراتب أدنى في أهميتها. المسألة العظيمة الأولى هي أصل الكون؛ والثانية هي طبيعة الوعي. ستأخذ مسألة أصل الكون المكان اللائق بها بعد أن

نكون قد دفعنا إلى مدى أبعد قليلاً النظرياتِ الحديثةَ للجسيماتِ والجاذبية الكمومية، ويمكننا التوقّع أن يصبح بالإمكان حلّها بعد التوصل إلى عددٍ قليل من الأفكار العظيمة. أما مسألة الوعي فقد تكون مختلفةً تماماً، ومن الممكن التصوّر بأنها ستُحَلُّ دون تطويرِ فكرةٍ عظيمةٍ خاصةٍ بها.

أولاً، أشك في أنّ ظاهرةً، لها درجةُ تعقيدِ الوعيِ، لا يُمكنُ تلخيصُها «بقانونٍ» بالمعنى التقليديِّ لهذا المصطلح. فالدماغ، الذي هو الآن الجهازُ الوحيدُ المعروفُ عنه أنه قادرٌ على توليدِ معنًى للوعي، يستفيدُ من كثيرٍ من أنماط النشاط، ويمتلك مناطقَ تتركّزُ فيها وظائفُ معينةٌ، لكنّها ليستْ موضعيّةً كلّياً، لذا لا يمكننا التوقُّعُ أنْ نلخّصَ وظيفَتَهُ في جملةٍ أو اثنتين، أو في صيغة رياضيّة. أنا أظنّ أننا لن نتوصّل إلى فهمٍ للوعي إلاّ عندما نكون قد نجحنا في محاكاته. وبالطبع، فإن هذه الفكرة لا تنكر أهمية الطرائق التي تسلكها حالياً العلومُ العصبية neurosciences لدراسة الدماغ، ومن ضمنها علم النفس، وعلم الأدوية، وعلم الفيزيولوجيا، وذلك أننا بحاجةٍ إلى أن نعرف بالتفصيل الأشياءَ التي يجب دمجها في محاكياتنا simulations. بيد أنه يتعين علينا هنا أن نلزمَ جانب الحذر، إذ إنه ليس من الضروري دمجُ كلِّ شيء يُكتَشَفُ، فالطائرةُ ليستْ بحاجةٍ إلى تجهيزها بريشٍ، أو إلى وضع محرّكاتها في قُمرةِ أمتعةِ الرُّكّابِ. ولا تعني هذه الفكرةُ أيضاً أنّ الأسلوبَ المتّبع حالي في بعض المراكز لتأسيسِ آليّاتِ الوعي على الظواهر الكوانتية، وذلك، مثلاً، ضمنَ الأنابيب المكروية microtubules، لا يمكن دمجه. وفي الحقيقة، فقد يكون بالإمكان إنجاز الوعي من النمط 1 (كما يمكن تسميته) بواسطة بناء جهازٍ لا يحاكي سوى الفيزيولوجيا العصبية neurophysiology الكلاسيكية، ويضمّ اللدونةَ المدهشةَ للوصلات العصبيّةِ ودقّة التوصيل والفعالية الكيميائية، ثم السير قدماً لإنجاز الوعي من النمط 2 عن طريق بناء جهازٍ يدمج الآثارَ الكوانتيةَ (الكمومية) ـ المُبْعَدَةَ عن موقعها الصحيح ـ التي لها أنماطٌ اقترحها أولئك الذين يعتقدون أنها لا بدّ أن تكون ملازمة للوعي. وعندئذٍ تبرزُ مهمةٌ صعبةٌ هي اكتشاف ما الذي يمكن للمحاكي من النمط type 2 emulator 2 أن يفعله، أو يُظَنّ أن بإمكانه أن يفعله، ومنا الذي لا يمكن

للمحاكي من النمط 1 أن يفعلَهُ، أو يُظَنّ أنه ليس بإمكانه أن يفعلَهُ. وإذا تبيّن، كما أظنّ، أننا نفسنا من النمط 1 لا أكثر، فبوسعنا فهم أننا لن نتعرّف الإنجازات المختلفة لوعيٍ من النمط 1 على أنه وعيٌ، وعندئذٍ نحذفه باعتباره إخفاقاً.

واختصاراً نقول إنه على الرغم من احتمال عدم وجود «نظرية للوعي» إطلاقاً ـ وفي الحقيقة، فقد تكون الفكرةُ نفسُها غيرَ ملائمةٍ ـ فثمّة احتمالٌ أنْ يكون بالإمكان إنجازُ تَحَاكٍ. إن عمليةَ بناءِ ذلك المحاكي ستكونُ، بمعنًى من المعاني، إنجازَ فهمِ طبيعةِ الوعْيِ. وبالطبعِ، سيحدُث استكشافٌ غيرُ منتهٍ للفروق بين الوعي الطبيعي، وهو وعْيُنَا، والوعْي المحاكَى، وليس بمقدورنا البتّة أن نكونَ متوثّقين تماماً من أنّ الوعي الاصطناعيّ هو، من جميع النواحي، مثل الوعي الطبيعيّ، أو أننا أوجدنا، ببساطةٍ، شيئاً آخر لن نفهمه أبداً. وربّما كان الغرباءُ الوحيدون الذين لن نقابلَهم بتاتاً هم أولئك الذين نكوّنهم نحن أنفسُنَا. ويمكنُنَا أن نتركَ للأجيالِ المقبلةِ المشكلاتِ الأخلاقيةَ المرتبطةَ بحقوقِ هذا اللاكائنات non-beings التي كُوِّنَتْ اصطناعيًّا، والتي تُدْرَكُ بالحواسِّ، وبخاصةٍ حقوقها في الموت، وفي تلقِّي معاملةٍ خاصةٍ إذا أصيبت بالعجز، وفي إمكان استنساخنا لها ولتجاربها بالضبط، وفي إمكان أن تتطوّر أعراقٌ مختلفةٌ من اللاكائنات الواعية ويجدُ كلٌّ منها الآخر غيرَ مقبولٍ، وفي بروز أنظمة للإيمان ضمن المحاكين الفرديين أو قبائل مِنْهُمْ تقوّض العقلانية المفترضة لتصرفاتهم، وفي احتمال أن تجد هذه اللاكائنات الذكية أي أنماطَ السلوكِ الغريبةِ للوعْيِ البشريّ متبعةٌ، وأن تتخذ الإجراءات المناسبة ـ بعد إصدار حكمٍ تشاؤمي، لكنْ واقعي، يتعلق بالحِمْلِ الذي يضعه البشر على كوكبهم. ويوجه هنا، بوضوح، مجالٌ واسعٌ لرحلةٍ جديدةٍ يقوم بها غاليڤر Gulliver.

●

لقد تَطرّقْتُ إلى النماذج المتحوّلة في العلم. وثمة اثنان منها أكثرُ قرباً إلينا، وهما موجودان بيننا الآن.

إن بروزَ الحاسوب، مع ما يتميَّزُ به من قدرةٍ على التعاملِ مع الحسابات

العددية المرهقة، يؤدي إلى ابتعادنا عن التحليل ـ طرح وسائل وحلّها ـ إلى الحسابات العدديّة. وإذا ما استعملْنا هذا التغيُّر بطريقةٍ سليمةٍ، فإن هذا شيءٌ رائعٌ لأنه يعزّز استطاعةَ العلماء، الذين أصبحَ بمقدورهم الآن، بدلاً من تخيّلهم، معالجةُ معادلةٍ غيرِ قابلةٍ للحلّ في نظريةٍ ما، باللجوء إلى معالجتها حاسوبيًّا وتحليلِ كلِّ مقتضياتها. ويمكننا أن نرى الآن أنه يمكن أن يكون للمعادلاتِ، التي تبدو صغيرةً وغيرَ مهمّةٍ ظاهريًّا، تداعياتٌ استثنائيةٌ. ويجب ألا نُصاب بالدهشة من قدرتنا على حلّها عدديًّا، لأنني عانيتُ نفس الدرجة من الدهشة في المقدمة عندما نظرْتُ في المعايير المستعملة للحكْمِ على فكرةٍ أنها عظيمة.

لكن الخطر هنا مضاعفٌ: فقد نلجأ إلى الحلّ الحاسوبيّ في الوقت الذي يمكن فيه إيجاد الحل التحليليّ ببذل جهدٍ أكبر قليلاً. هذا هو الكسل، ومع أن هذا مدعاةٌ للأسفِ لنا نحن الذين نشأنا على جماليّات التعبيرات التحليلية، فإن هذا ليس بالأمر البالغ الأهميّة. الخطر الثاني أعمق: فاللجوء إلى الحلّ التحليليّ قد يُبعدنا عن الفهم. فعند العثور على حلٍّ تحليليٍّ، يمكننا الادّعاءُ بأننا نفهم النتيجةَ، لأننا، من وجهةِ المبدأ، يمكن استيعاب كلِّ خطوةٍ في الطريق الذي انتهى بنا إلى الحلِّ. وعندما تُوجد نتيجةٌ عدديةٌ، فهناك استيعاب أضعف للصلة بين البذرة (المعادلة) والنتيجة، لأننا لا نشعر بأن النتيجة جزء من كيان المسألة، خلافاً لشعورنا عندما نعمل على الاشتقاق التحليلي للحلّ خطوةً خطوةً. ومع ذلك، فإنه يُفَضَّلُ التوصّلُ إلى نتيجةٍ عددية عند عدم الحصول على حلٍّ، ومع مرور الوقت، نشعر بارتياحٍ متزايدٍ، ونعثر على طرائق لِتَمَثُّلِ الحساباتِ العدديةِ. وما يجعل هذه الحساباتِ رائعةً هي الطريقةُ المتميّزةُ التي يمكن الآن لفن الرّسم البيانيّ أن يستعملها لعرض الحلّ. ونحن نوجَدُ حالياً في وسط مرحلةِ الانتقال من رؤيةِ جمالِ الحلِّ التحليلي وأناقتهِ، إلى رؤية جمالِ صورةِ الحلِّ الحاسوبيِّ وأناقته.

الانتقالُ الثاني هو ذاك الذي يجب التعاملُ معه بقدْرٍ أكبرَ من الحرصِ والحذرِ. وقد ذَكَرْتُ في عدةِ مواضعَ من الكتابِ أن العلْمَ، في حالاتٍ معينةٍ، يصرفُ عن الذِّهن السِّمَةِ التي كانتْ مصدره الرئيسيّ، وهي التجربة. فثمة تجاربُ معينةٌ ستظل دائماً خارج النِّطاق في الكوسمولوجيا (علم الكون)، ويعود السببُ في ذلك، أحياناً، إلى أنّ

للطاقةِ المطلوبةِ قدراً كونيًّا، وأحياناً أخرى، أننا نملك قدرةً محدُودةً على رصد كونٍ وحيدٍ كان موجوداً سابقاً. وقد أوْرَدْتُ في الفصل 6 نظريةَ الأوتار بصفتها مثالاً على نظريةٍ تبدو غيرَ قابلةٍ للاختيارِ تجريبيًّا.

ثمة رَدّا فعلٍ اثنان على الأقل على إهمال القدرةِ على إجراء التجارب. أحدهما هو اعتبارُ جميعِ النظرياتِ غيرِ القابلةِ للاختبارِ خارجَ نطاقِ العلمِ، ولا يُوجد منها ما يُقْبَلَ على أنها تشير إلى الحقيقة مثل أيٍّ من نظريات أرسطوطاليس. وهنا يرتجف إصبع غاليليو ناصحاً ومحذِّراً، مشيراً إلى أنّ هذه نشاطاتٌ ذهنيّةٌ وليستْ علماً. وبالطبع، يتمسّكُ بعضُ الناس بتلك الفكرة في نظرية الأوتار، ويتمسّك بها آخرون، ولكنْ في الانتقاء الطبيعي. وثمة بديلٌ هو اعتبار العلم أنه نضجَ إلى الحدّ الذي يمكن أن نعتبر فيه النظرياتِ، التي لا يمكن التحقُّقُ من صحتها، صحيحةً، ولكن بحذرٍ. وهكذا إذا حدّدتْ نظريةُ كتلِ الجسيماتِ الأساسيّةِ، وتنبأتْ بأن العالَمَ ثلاثيُّ الأبعاد، فقد يمكن الاعتراف بأن لها مشروعيّةً فخريّةً، على الرغم من عدم وجود طريقة معروفة، أو طريقةٍ عمليّةٍ، لاختبارها. وكان من الممكن أن يكون مثلُ هذا الموقف مرفوضاً عندما كان القسمُ الأساسيُّ من المعارفِ العلميّةِ هزيلاً، لكننا الآن ـ مادامت التناقضاتُ الذاتية غيرَ موجودةٍ في القدْر الكبير من الحقائق المعروفة ـ قد نقبل، بحذرٍ، مشروعيّةَ مثل هذه النظرية غير القابلة للاختبار. والآن يرفع غاليليو إصبعه لأخْذ الحذر. فإذا ظَلَلْنَا مصرِّين على قابليّة التحقق ـ علماً بأن للمنهج العلمي كل الحق أن يطلب ذلك ـ فإن الثمن الذي يجب دفعه قد يكون إيقاف التطوّر العلميّ، بمعنى الكفّ عن اكتشاف الأساسيات؛ وبالطبع، فلا يوجد أثر لهذه الفكرة في تطبيق العلم، حيث يُفترض ألا يجري اختصارُ التجربة البتّة بنفس الطريقة.

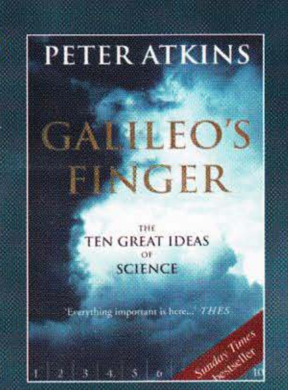
لقد اسْتَعْمَلْتُ المصطلحَ «قابلية التحقق»، وهذا يجعلني على صلةٍ بوجهة النظر المشهورة التي أبدعها كارل پوپر K. Popper، والتي مفادها أنّه من غير الممكن إطلاقاً التحقُّقَ من النظريّاتِ بالمعنى الدقيق للكلمة، لكنْ علينا أن نكون قادرين على دحضها إذا اعتُبِرَتْ نظرياتٍ علميةً. أيْ أنه يجب وجودُ تجربةٍ تسمح، من وجهة المبدأ، بإثبات أن النظريةَ زائفةٌ. الانتقاء الطبيعيُّ قابلٌ للدحض

(خلافاً لِمَا يظن البعض) لأنّ له، مثلاً، تداعياتِهِ على البيولوجيا الجزيئية، كما أشرنا في الفصل 1. النسبيّةُ العامّةُ قابلةٌ للدحض، لأن لها تداعياتٍ على حركةِ الأشياءِ قرب الأجسام الثقيلة، كما سبق ورأينا في الفصل 9، منها مبادرة precession مدار عُطارد، وانحناء الضوء قرب المجرّات. إن قانونَ انحفاظِ الطاقةِ، وقانونَ الزيادةِ في الإنتروبيا (القانون الأول والقانون الثاني في علم الثرموديناميك) قابلان للدحض، لأن لهما تداعياتٍ من ضمنها وجودُ آلات الحركةِ الدائمةِ.

تُرى، هل نظريةُ الأوتارِ قابلةٌ للدحضِ؟ هذه النظريّة غامضة جدًّا حالياً، ولها أيضاً عدد قليل جدًّا من التنبؤات المعرّفة جيداً. لكنْ لنفترض أنها ليست كذلك، كَأَنْ نفترضَ أن النَّصَّ المستقبليَّ للنظرية M يَتَّخِذُ صيغةً تتنبأُ بجميع الكتلِ المعروفةِ للجسيماتِ الأساسيّةِ، وبجميع قيم الثوابت الأساسية، وببنية الزّمكان، لكنها لا تقترح مطلقاً تجربةً أخرى. لن تكون تلك النظريةُ قابلةً للدحض لأنها تنبأتْ بدقةٍ بجميع الخاصّيّات الأساسيّة للكوْن، وأنا أشكّ في أنّنا سنكوِّنُ رأياً مفاده أنها كانت صحيحةً، وأنّها سَتُشْتَهَرُ بوصفها تمجيداً للإنجاز العلمي.

تُرى، ما الذي سيعمله العلماءُ إذا ترسّخت نظريةُ كلِّ شيء، واستُعملتْ للتنبؤِ بجميعِ الخاصِّيَّاتِ المعروفةِ للكونِ؟ سيقومُ البعضُ بإشاحةِ وجهه عن ذلك، واستكشافِ تشعُّبَاتِ هذه النظرية النهائيّة. لكنّ هذا سيجعلهم منشغلين بهذا الموضوع إلى الأبد، شريطةَ استمرارِ الحضارةِ. ومع ذلك، سيكون آخرون قلقين على الانسجام الذاتيّ لتلك النظرية النهائية، لأنّ مبرهنةَ غُوديل، وتداعياتِهَا السلبيةَ لتوفيرِ مثلِ هذه البراهين، ستكون ماثلةً في أذهانهم (الفصل 10). وسيكونُ أولئك، الذين لا يشعرون بالقلق من الانسجام الذاتيّ، مستيقظين طوال الليل وهم يفكّرون في استحالة إثبات أن النظريةَ النهائيةَ وحيدةٌ وفريدةٌ. وقد يكتشفون حتى نظريةً لكلِّ شيءٍ تبدو ظاهريًّا مختلفةً كلِّيًّا، ولها نفس الاقتضاءات، لكنْ دون أن تكونَ مطابقةً رياضيًّا للنظريةِ المنافِسةِ، وأنْ تقتضي أن يكونَ الكونُ مختلفاً كلِّيًّا عمّا كان يُفتَرَضُ حتى الآن. ولا عَجَبَ في ذلك، فهذا هو العلم.



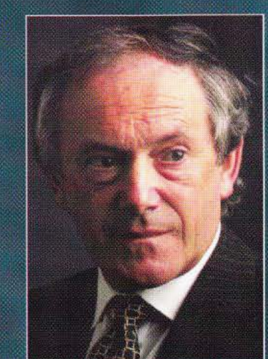


لماذا سمي الكتاب إصبع غاليليو؟

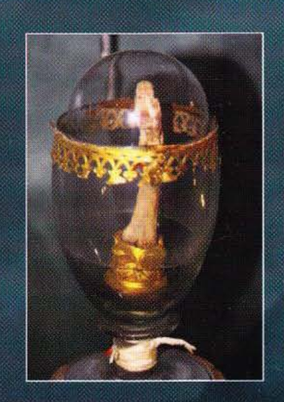
إن غاليليو، الذي يوجد إصبعه محفوظاً في وعاء معروض في فلورنسا، وفّر قوة دفع كبيرة للعلم الحديث، ومهد السبيل للقضاء على الجهل الذي ساد في القرون الوسطى. وفي وصف **بيتر أتكينز** العبقري للفكَرِ المركزية للعلم المعاصر، فإنه يمجد في كتابه، الذي هو أكثر الكتب رواجاً ومبيعاً، النهج العلمي لكشف النقاب عن كوننا، وعالمنا، وذواتنا.

التطور | الدنا | الطاقة | الذرات | التناظر

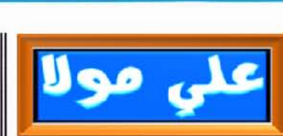
الكموم | الكوسمولوجيا | الزمكان | علم الحساب



بيتر أتكينز أستاذ الكيمياء وزميل في كلية لنكولن بجامعة أكسفورد. وقد ألَّف كثيراً من الكتب الجامعية في الكيمياء حظيت بشهرة عالمية مرموقة. أحد أسباب وجود هذه الكتب في الطليعة حتى الآن في جميع أنحاء العالم، بعد مرور أكثر من عقدين على تأليفها، هو موهبته الفذّة في قدرته على شرح الأشياء وتبسيطها – خاصة المفاهيم المعقدة – بأكبر قدر ممكن من الوضوح، وقد برزت هذه الموهبة في كتبه الموجهة إلى القارئ العادي (وصف ريتشارد دوكنز أحد هذه الكتب، الذي عنوانه «الخلق» بأنه أجمل كتاب في العلم المبسط ألِّف حتى الآن)، لكن هذا الكتاب «**إصبع غاليليو**» يعد الآن أكثر مؤلفاته عمقاً وبساطة وتأثيراً.



تبين هذه الصورة الإصبع الوسطى ليد غاليليو اليمنى، التي فصلت عن جثته بعد مضي قرن على وفاته، والتي عرضها المتحمسون المعجبون به. ويمكنك مشاهدتها اليوم في متحف تاريخ العلوم بفلورنسا.




9 789953 375908